



神経学入門： 脳の構造と機能

大腦皮質

大腦基底核

視床

視床下部

中腦

僑

延髓

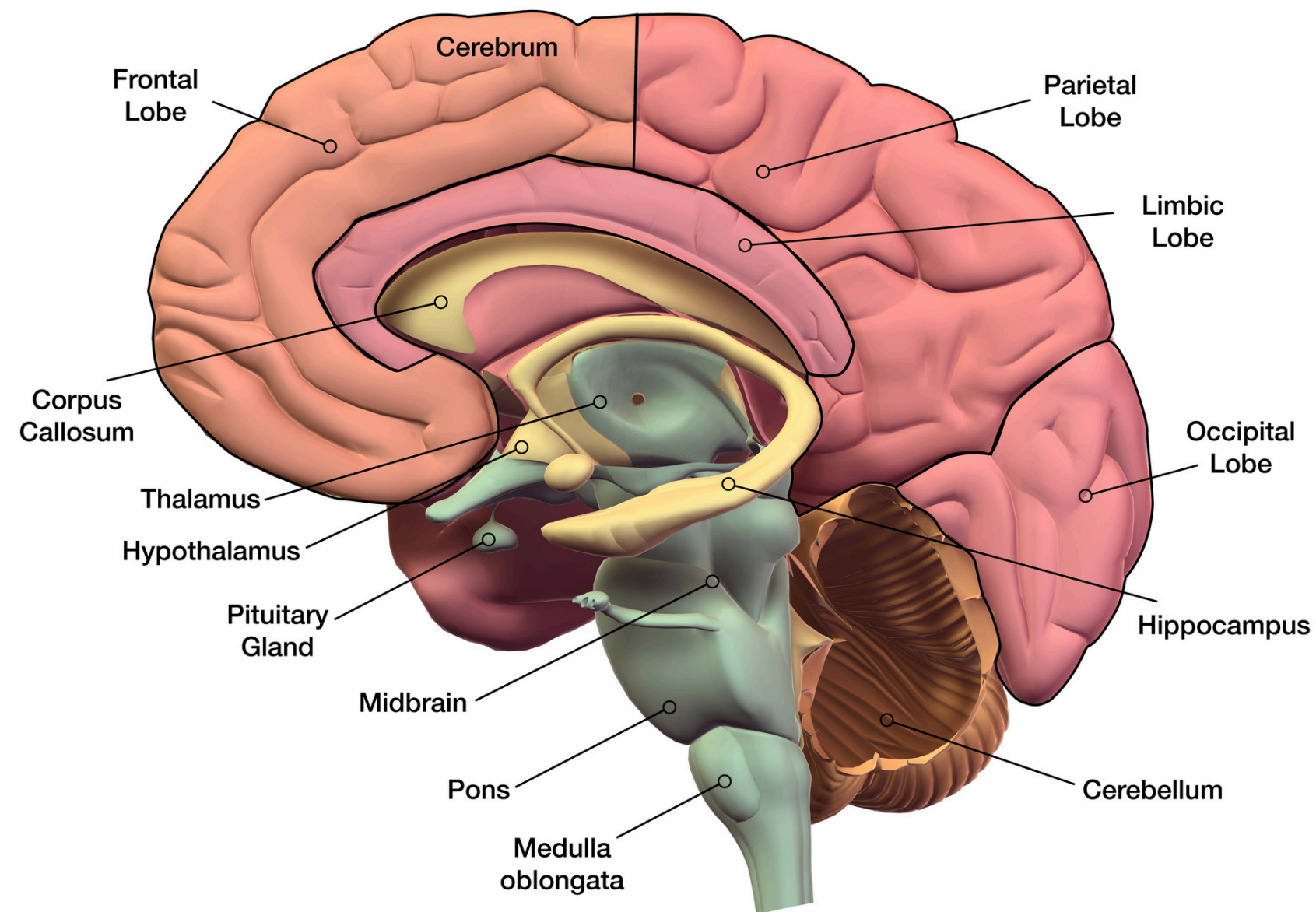
脊髓

海馬

小

扁桃體

腦



領域	主な機能	過活動	低活動
脊髄	感覚伝達、運動出力、反射、自律神経伝達	痙縮、クローヌス、慢性疼痛、過反射、自律神経過活動	弛緩性麻痺、感覚消失、反射低下、自律神経障害
延髄	呼吸、循環、嚥下、迷走神経機能、生命維持	呼吸過活動、嘔吐、自律神経嵐、血圧変動	呼吸抑制、嚥下障害、徐脈、循環不全、致命的障害
橋	睡眠、顔面感覚/運動、眼球運動、覚醒調整	REM睡眠行動障害、過覚醒、顔面痙攣	閉じ込め症候群、顔面麻痺、眼球運動障害、覚醒低下
中脳	ドーパミン、覚醒、姿勢、眼球運動、定位反応	幻覚、過覚醒、異常姿勢、過剰定位反応	パーキンソニズム、垂直注視障害、無動、覚醒低下
小脳	運動協調、タイミング、誤差修正、予測制御、認知補正	振戦、眼振、感覚過敏、運動過補正	運動失調、測定障害、平衡障害、認知協調障害
視床	感覚中継、皮質同期、意識、注意	てんかん性同期、疼痛増幅、振戦	感覚鈍麻、意識障害、注意低下、昏睡
視床下部	恒常性、自律神経、内分泌、摂食、体温、ストレス反応	不眠、交感神経過活動、食欲異常、不安、HPA過活性	無気力、低体温、内分泌低下、摂食低下、自律神経低下
扁桃体	恐怖、情動評価、顕現性、自律神経情動反応	不安、PTSD、過警戒、情動過敏、恐怖条件付け過剰	感情平坦化、危険察知低下、情動学習低下
海馬	記憶形成、空間認知、文脈処理	側頭葉てんかん、侵入記憶、過剰想起	記憶障害、アルツハイマー病、文脈認識低下
大脳基底核	運動選択、抑制、習慣化、行動選択	ジスキネジア、チック、衝動性、舞踏運動	無動、固縮、動作開始困難、パーキンソニズム
前頭葉	実行機能、意思決定、抑制、社会性、運動計画	衝動性、強迫、躁状態、過活動	無気力、注意低下、遂行機能障害、人格変化
頭頂葉	身体認識、空間認知、感覚統合	感覚過敏、身体違和感、幻肢感覚	半側空間無視、失認、感覚統合障害
側頭葉	聴覚、言語、記憶、情動統合	側頭葉てんかん、幻聴、デジャヴ	記憶障害、言語理解障害、意味記憶障害
後頭葉	視覚処理	光過敏、視覚幻覚、視覚過興奮	視野欠損、視覚失認、皮質盲
辺縁葉	情動、動機、記憶、自律神経統合	情動過剰、依存、過覚醒、情動不安定	無快感、情動鈍麻、動機低下、解離傾向

PART 2

小脳と大脳基底核

小脳

小脳

運動協調、タイミング、誤差修正、予測制御、認知補正

振戦、眼振、感覚過敏、運動過補正

運動失調、測定障害、平衡障害、認知協調障害

- 運動協調
- タイミング制御
- 誤差修正
- 予測制御
- 平衡・姿勢制御
- 眼球運動調整
- 運動学習
- 感覚運動統合
- 認知・情動補正
- 過活動：振戦・眼振・感覚過敏・運動過補正
- 低活動：運動失調・測定障害・平衡障害
- 認知協調障害（dysmetria of thought）

大腦皮質

大腦基底核

視床

視床下部

中腦

僑

延髓

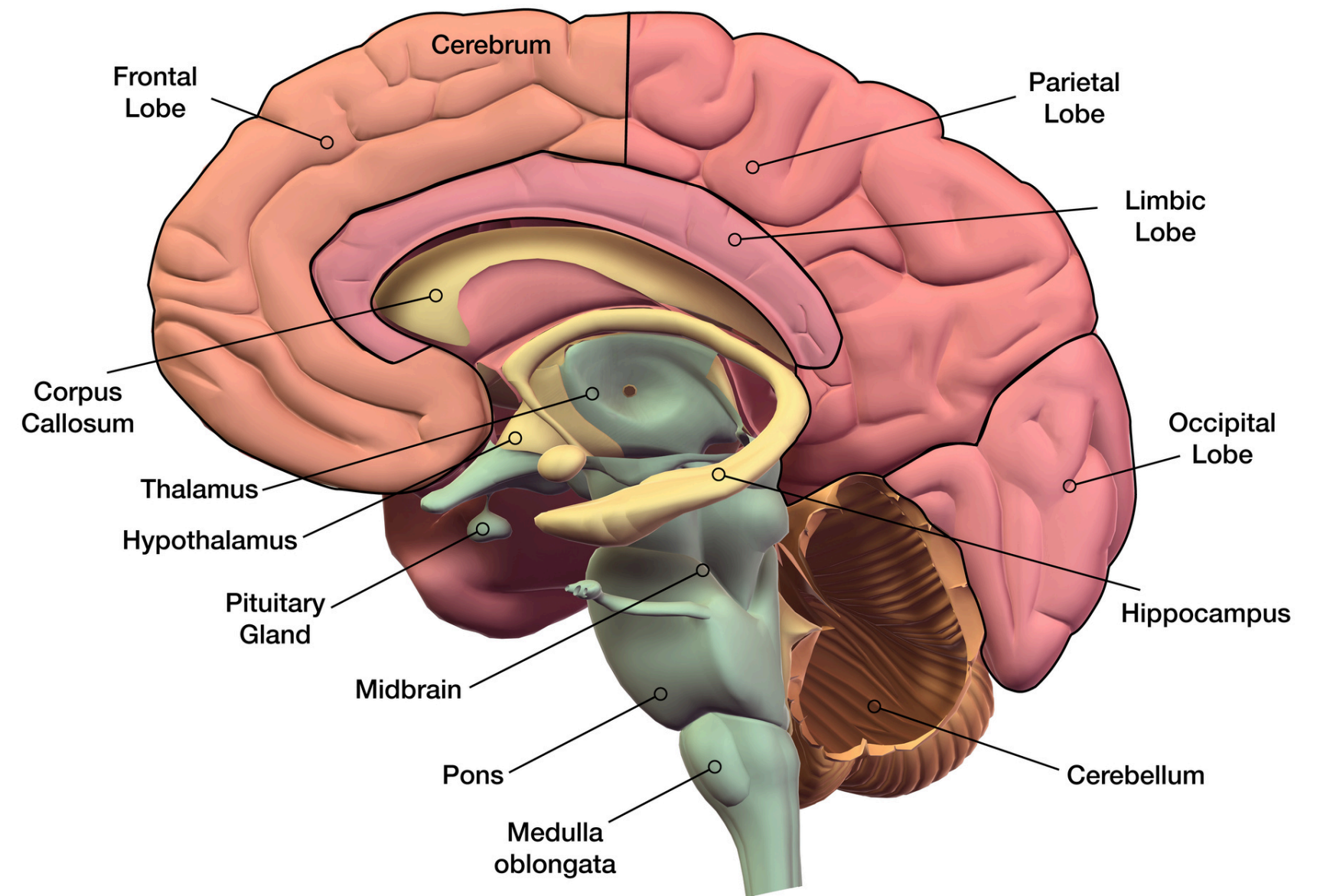
脊髓

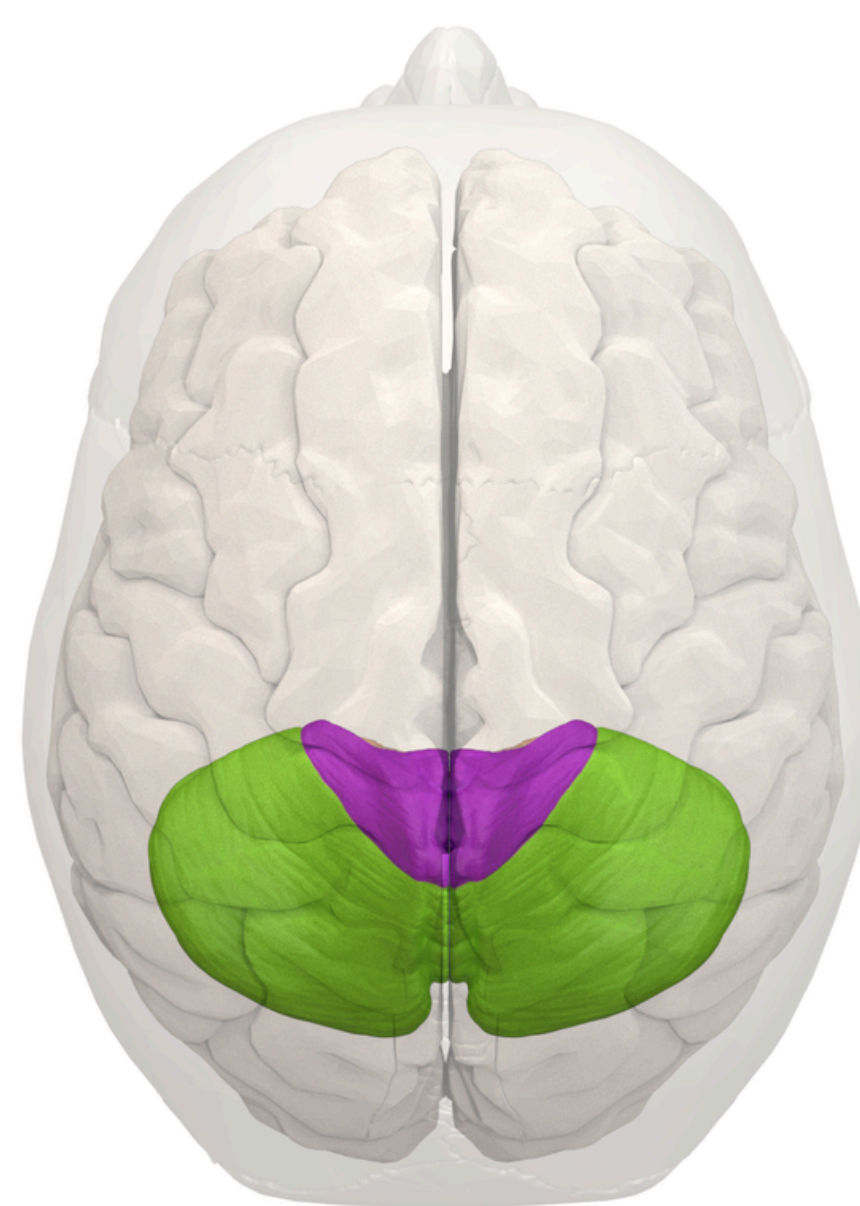
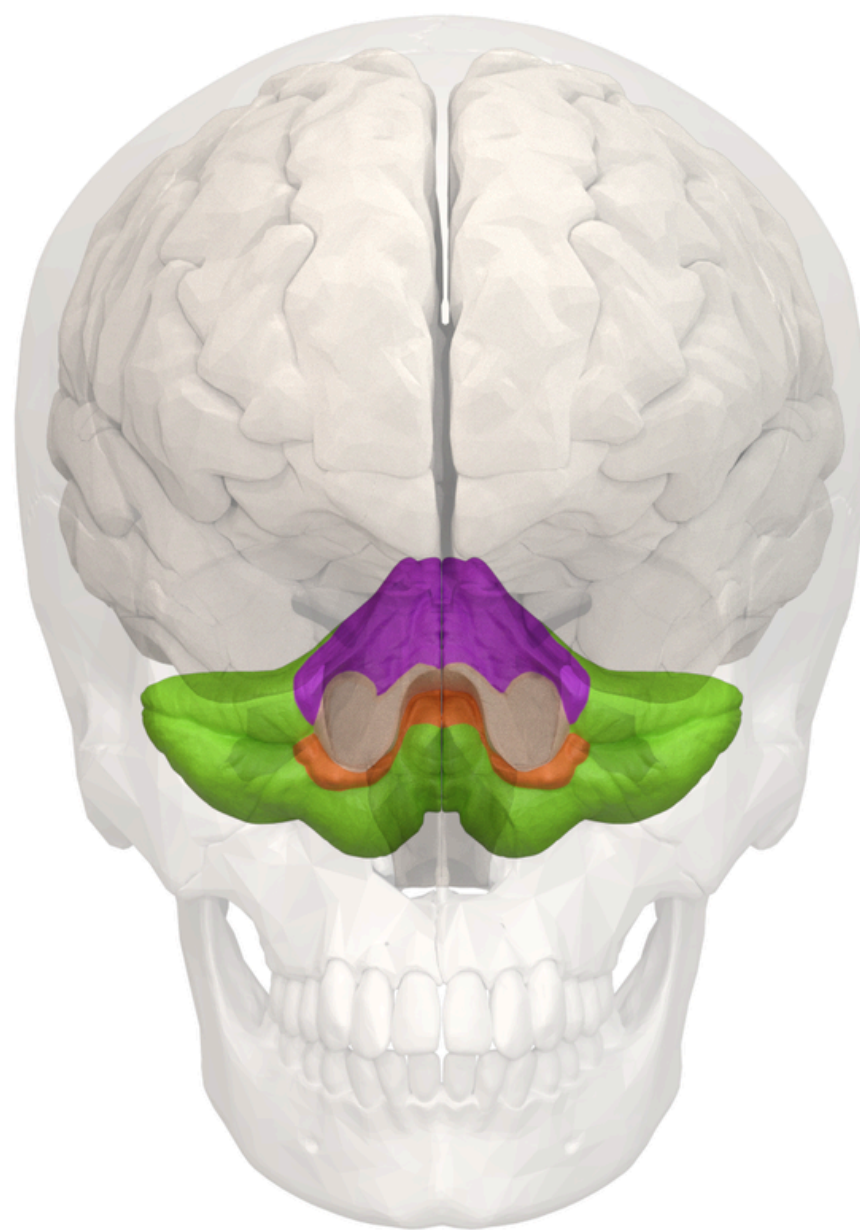
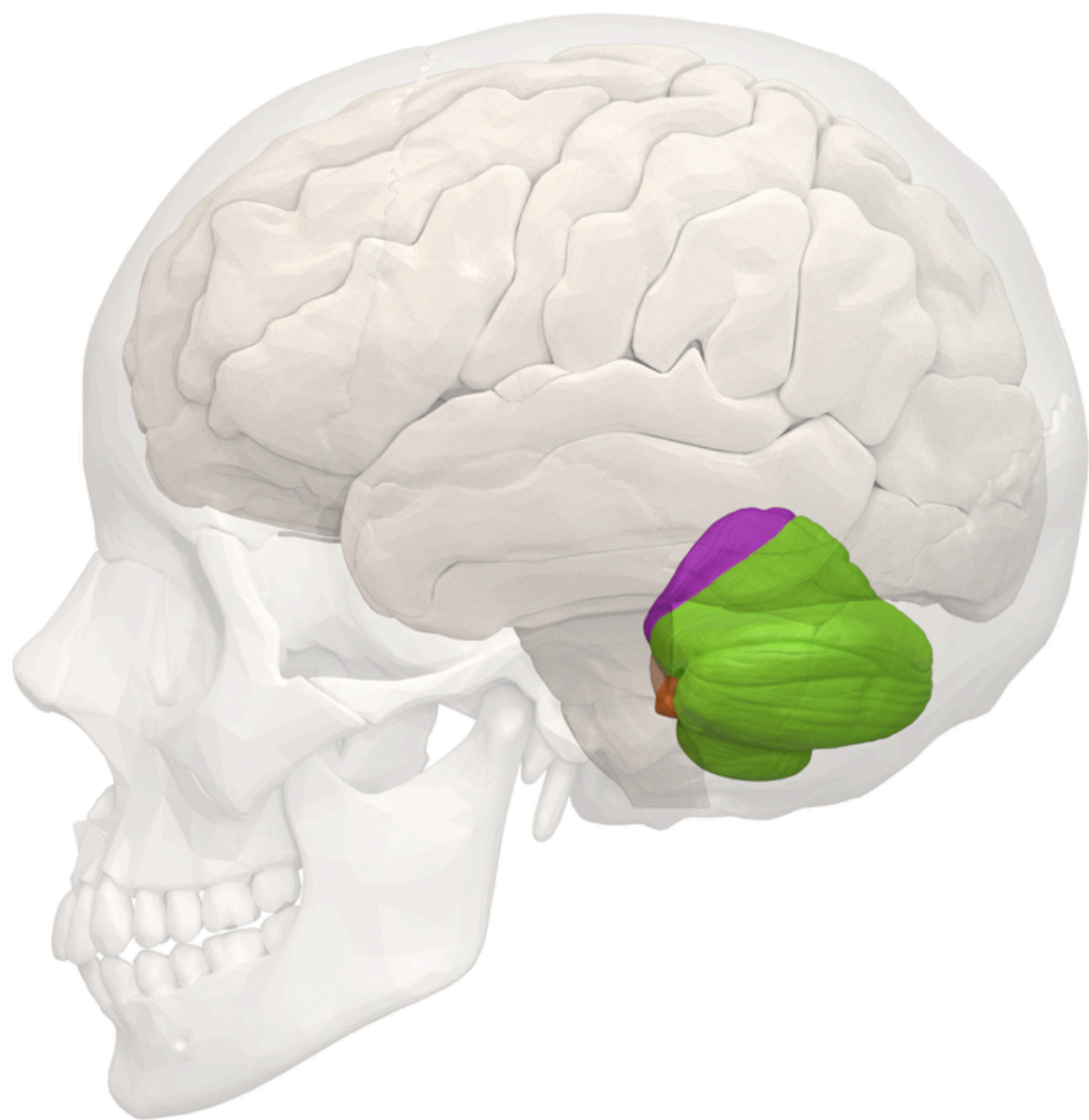
海馬

小

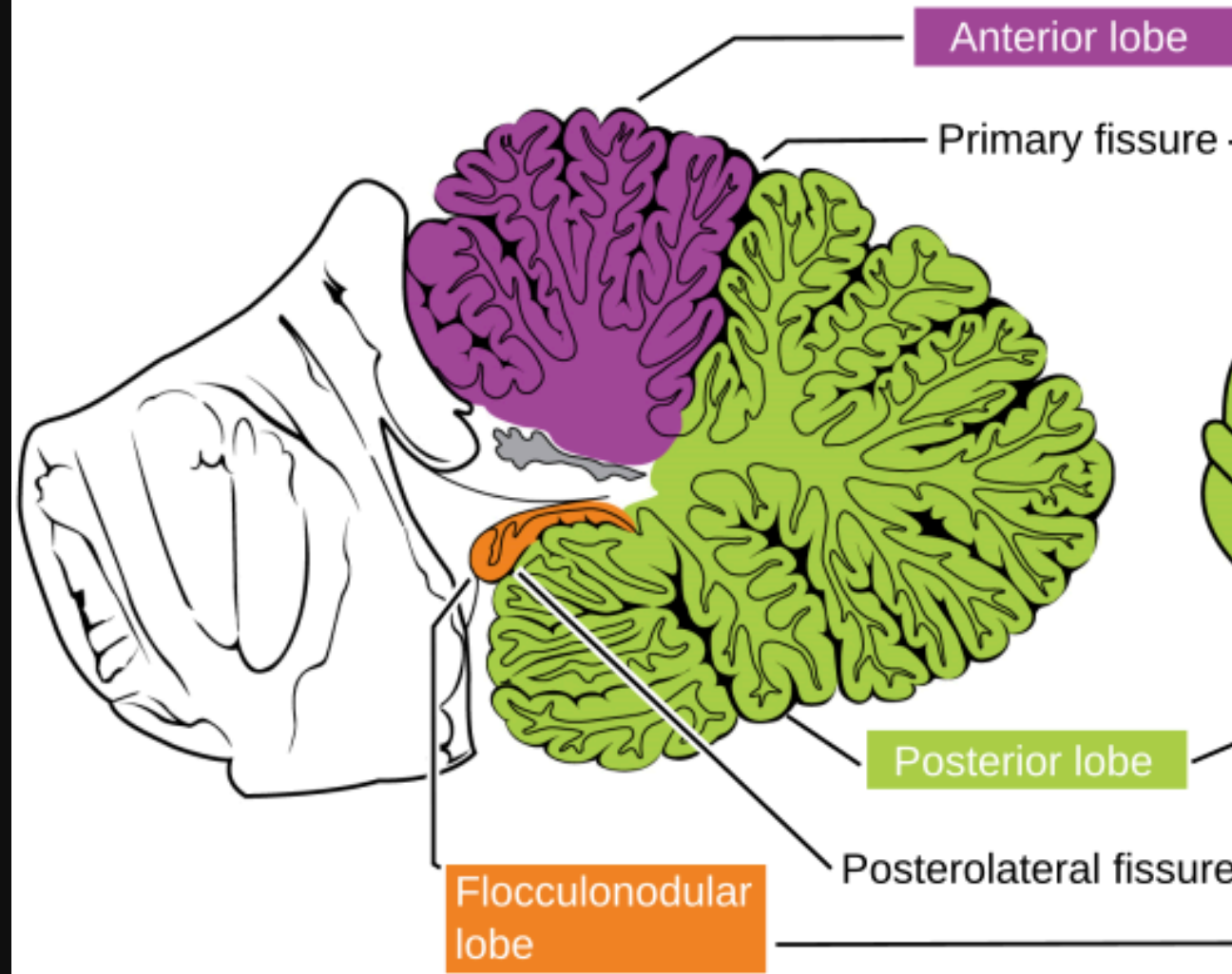
扁桃體

腦

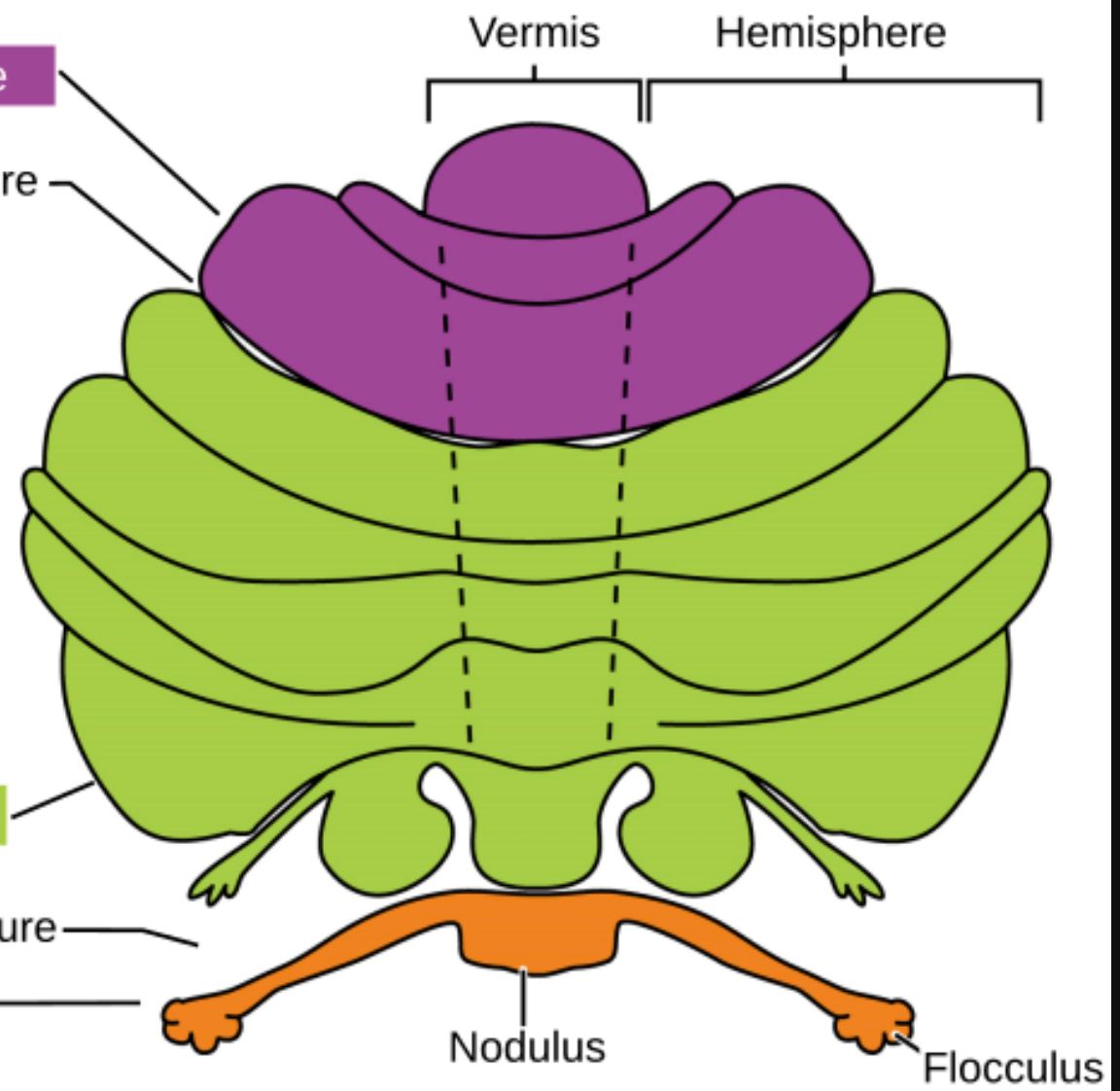




Midsagittal section of cerebellum



Superior view of an "unrolled" cerebellum



小脳の構造

葉 (Lobes)

- 前葉 (Anterior)
- 後葉 (Posterior)
- 片葉小節葉 (Flocculonodular)

ゾーン

- 虫部 (Vermis)
- 中間帯 (Intermediate)
- 外側半球 (Lateral Hemisphere)

小脳脚 (Peduncles)

- 上 (Superior)
- 中 (Middle)
- 下 (Inferior)

深部小脳核 (Deep Cerebellar nuclei)

- 室頂核 (Fastigial n.)
- 中位核 (Interposed n.)
- 歯状核 (Dentate n.)

葉 (Lobes)

前葉 (Anterior)

- 筋緊張制御
- 姿勢維持
- 歩行
- 四肢運動の調節

後葉 (Posterior)

- 計画・実行
- 学習
- 注意
- 言語
- 精密運動
- 作業記憶

片葉小節葉 (Flocculonodular)

- バランス維持
- 眼球運動



ゾーン

虫部 (Vermis)

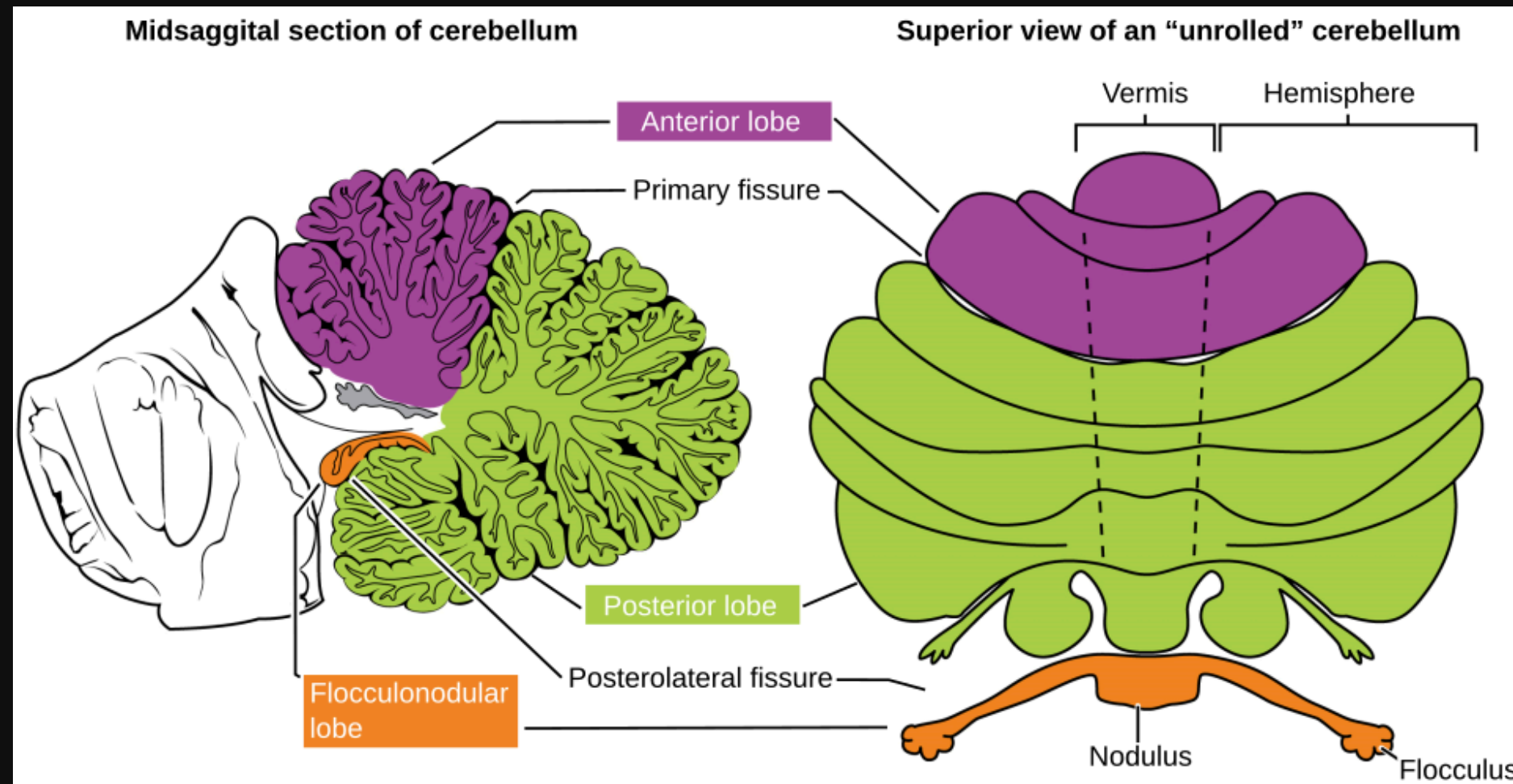
- 体幹
 - 姿勢制御
 - 歩行
 - 平衡
 - 眼球運動

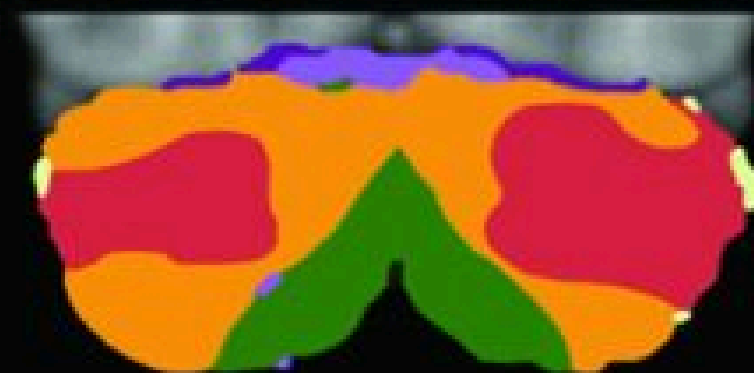
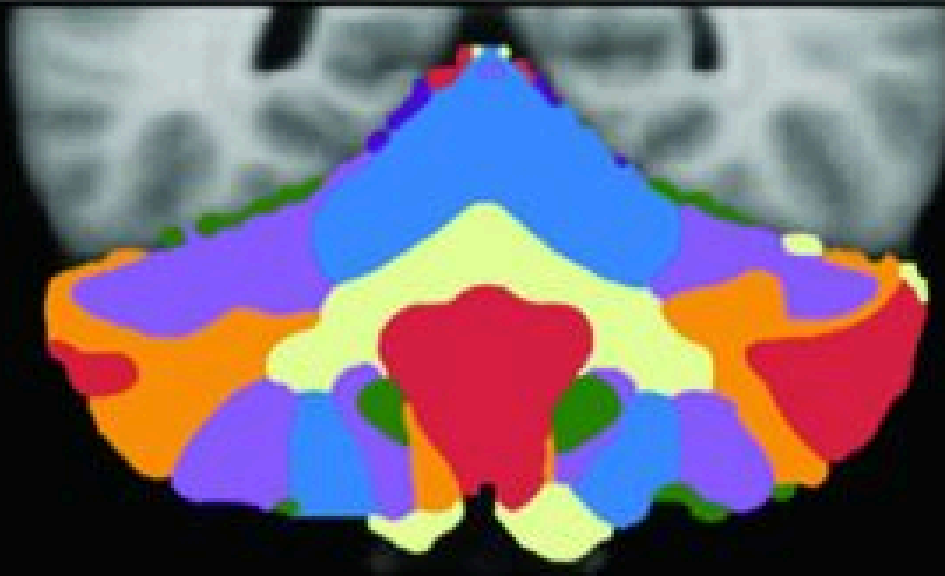
中間帯 (Intermediate)

- 近位四肢・遠位四肢
 - 運動調整
 - 誤差修正

外側半球 (Lateral Hemisphere)

- 大脳皮質
 - 運動予測
 - 運動計画
 - タイミング
 - 言語
 - 実行機能
 - 認知制御





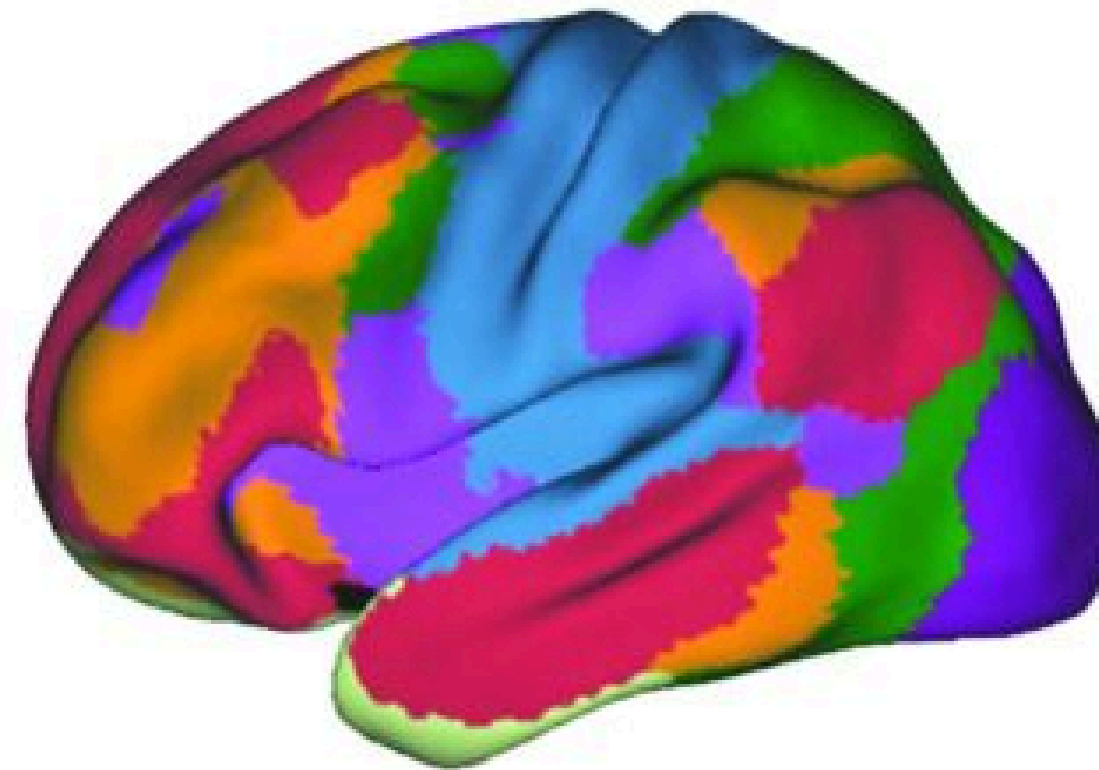
感覚・運動系

CEN (Central Executive Network)

- 思考ネットワーク

DMN (Default Mode Network)

- 自己・社会認知ネットワーク



小脳脚 (Peduncles)

上 (Superior)

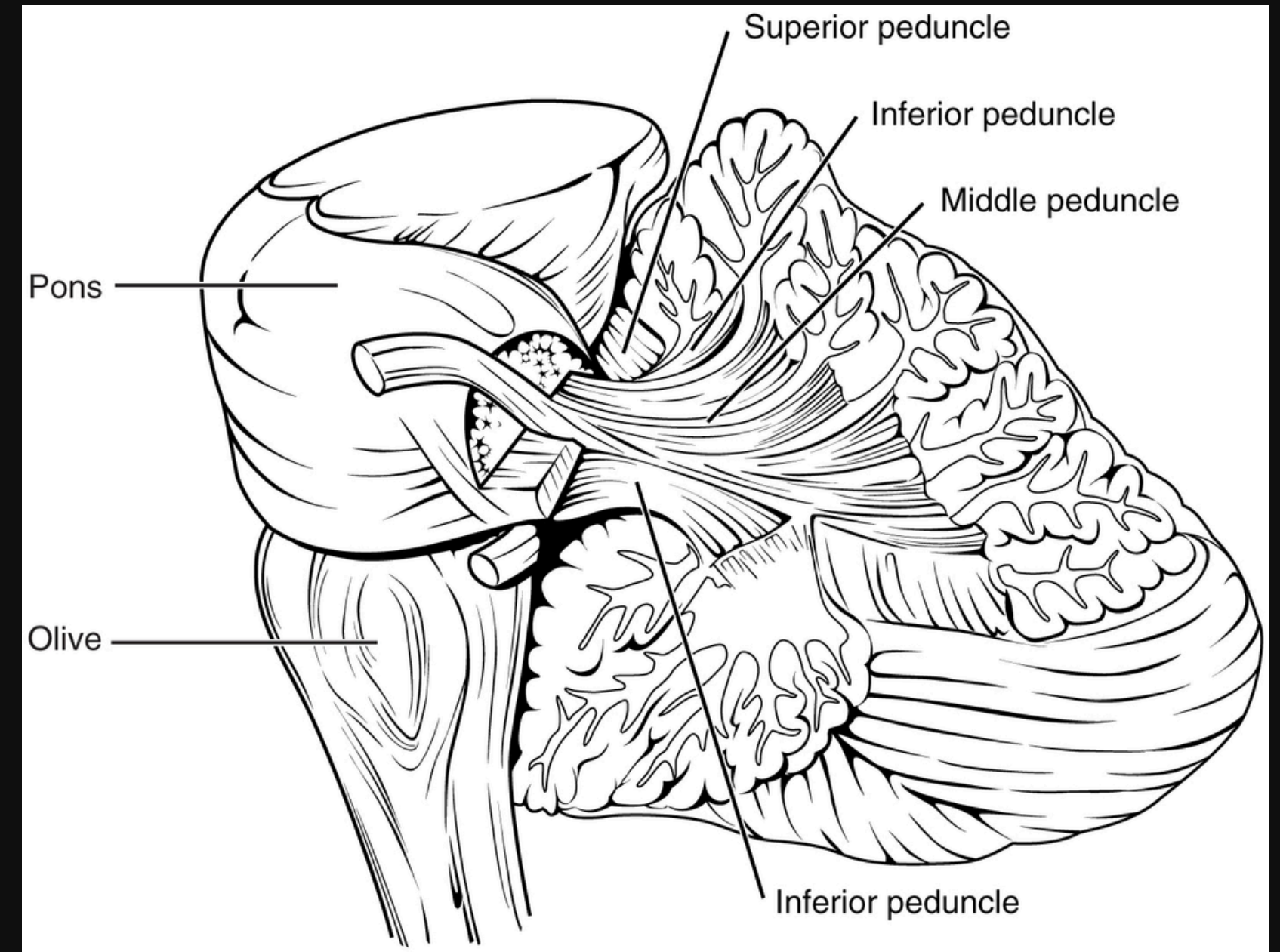
- 主要出力
 - 歯状核—赤核—視床—皮質路 (D-Rb-T-CT)

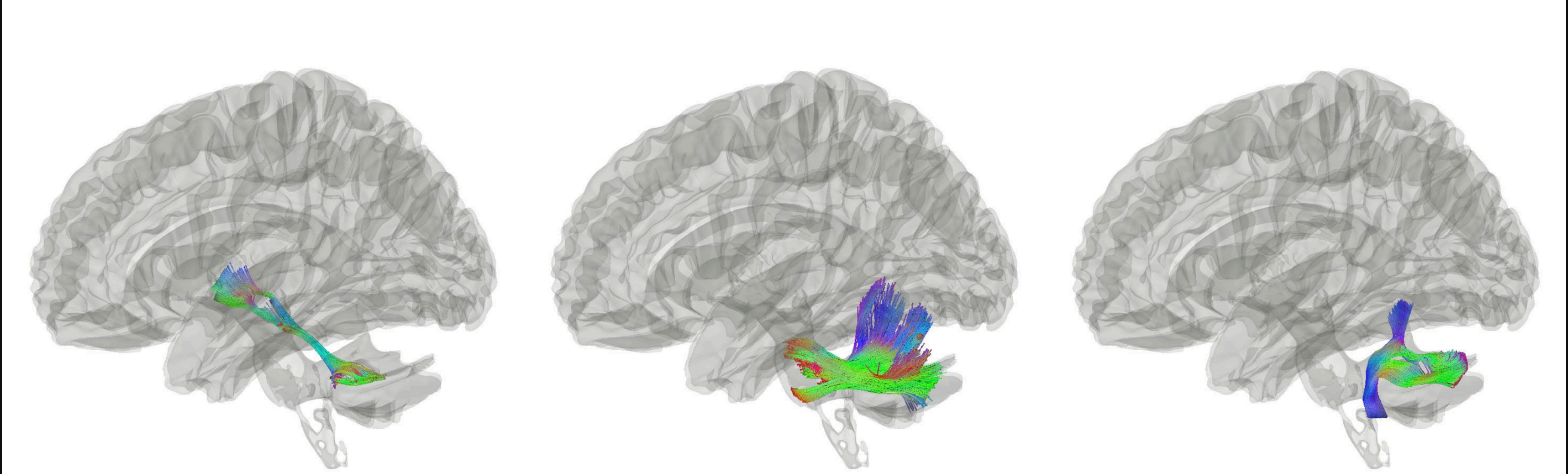
中 (Middle)

- 主に入力
 - 皮質—橋核—小脳路 (C-P-CbT)

下 (Inferior)

- 主に入力
 - 脊髓小脳路(SCbT)
 - 前庭
 - 下オリーブ核(Inf. Olivary n.)





深部小脳核 (Deep Cerebellar nuclei)

室頂核 (Fastigial n.)

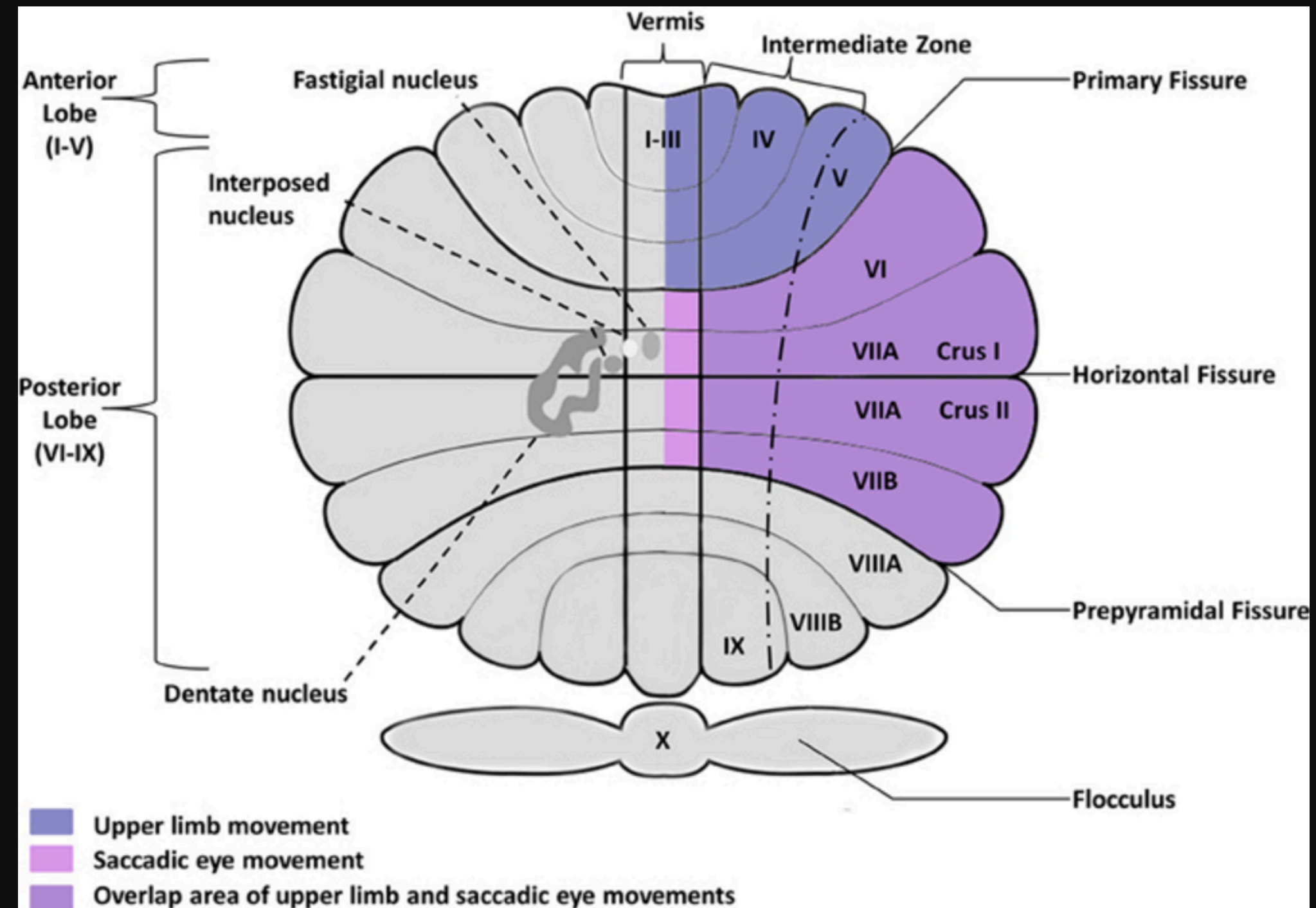
- 虫部
- 出力
 - 前庭核
 - 網様体
- 機能
 - 姿勢
 - 平衡
 - 眼球運動

中位核 (Interposed n.)

- 中間帯
- 出力
 - 赤核
 - 赤核脊髓路 (RbST)
 - 運動野
- 機能
 - 四肢運動調整
 - 誤差修正

歯状核 (Dentate n.)

- 外側半球
- 出力
 - 皮質
 - 運動野
 - 前頭前野
- 機能
 - 計画・実行
 - 予測
 - 認知
 - 言語



機能的解剖学

前庭小脳 (VestibuloCerebellum)

前庭器官



片葉小節葉



室頂核



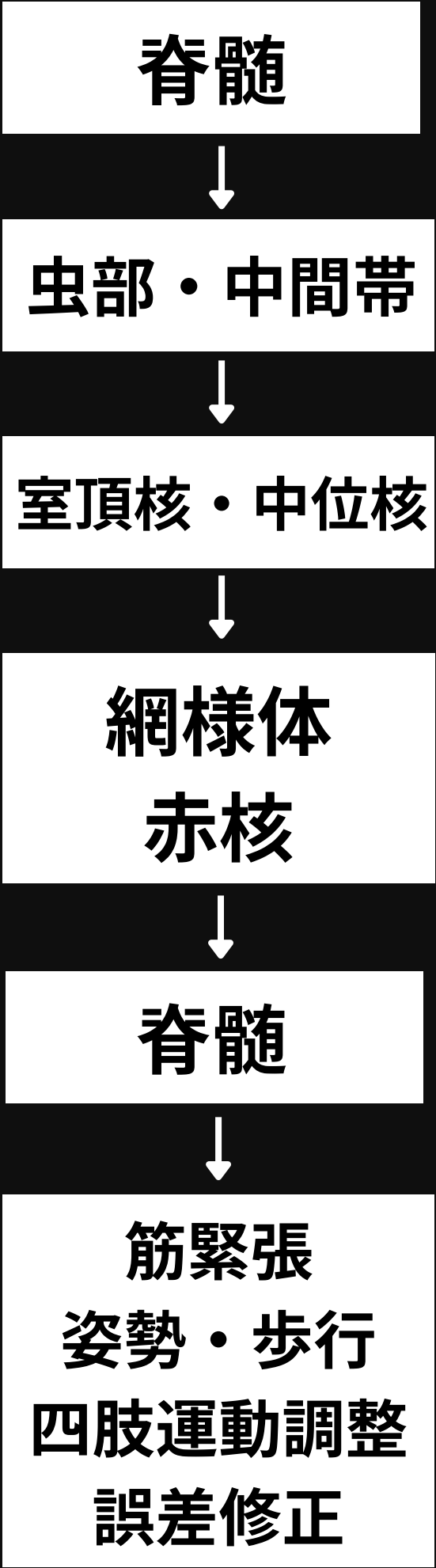
前庭核



平衡維持
前庭眼反射
(VOR)
眼球運動

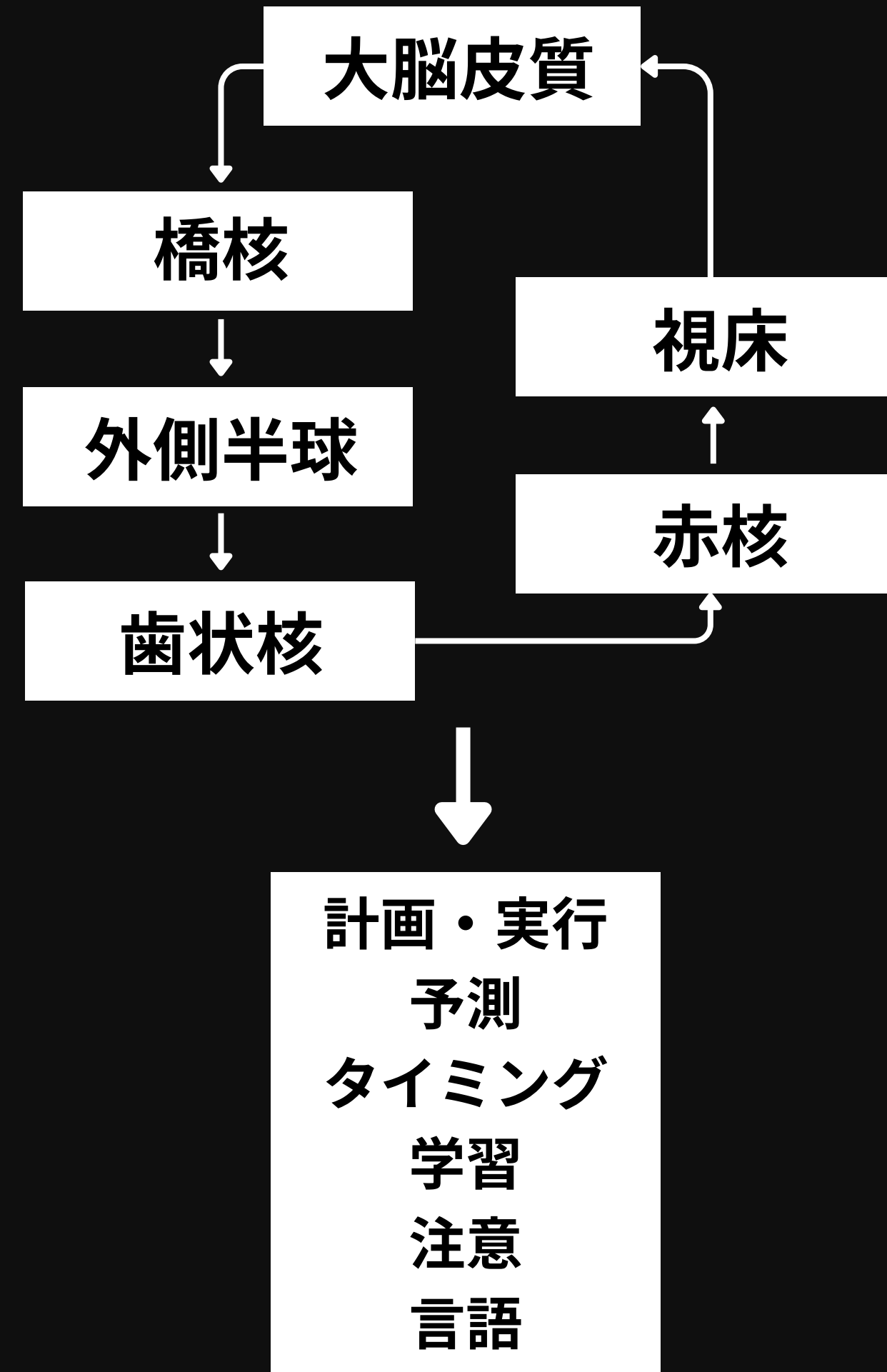
機能的解剖学

脊髓小脑（SpinoCerebellum）



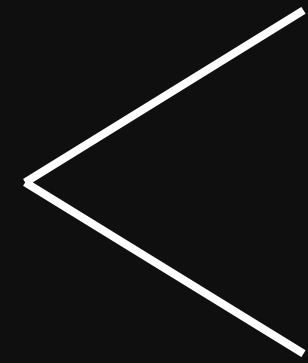
機能的解剖学

大脳小脳 (CerebroCerebellum)



小脳の機能

小脳の本質的な役割



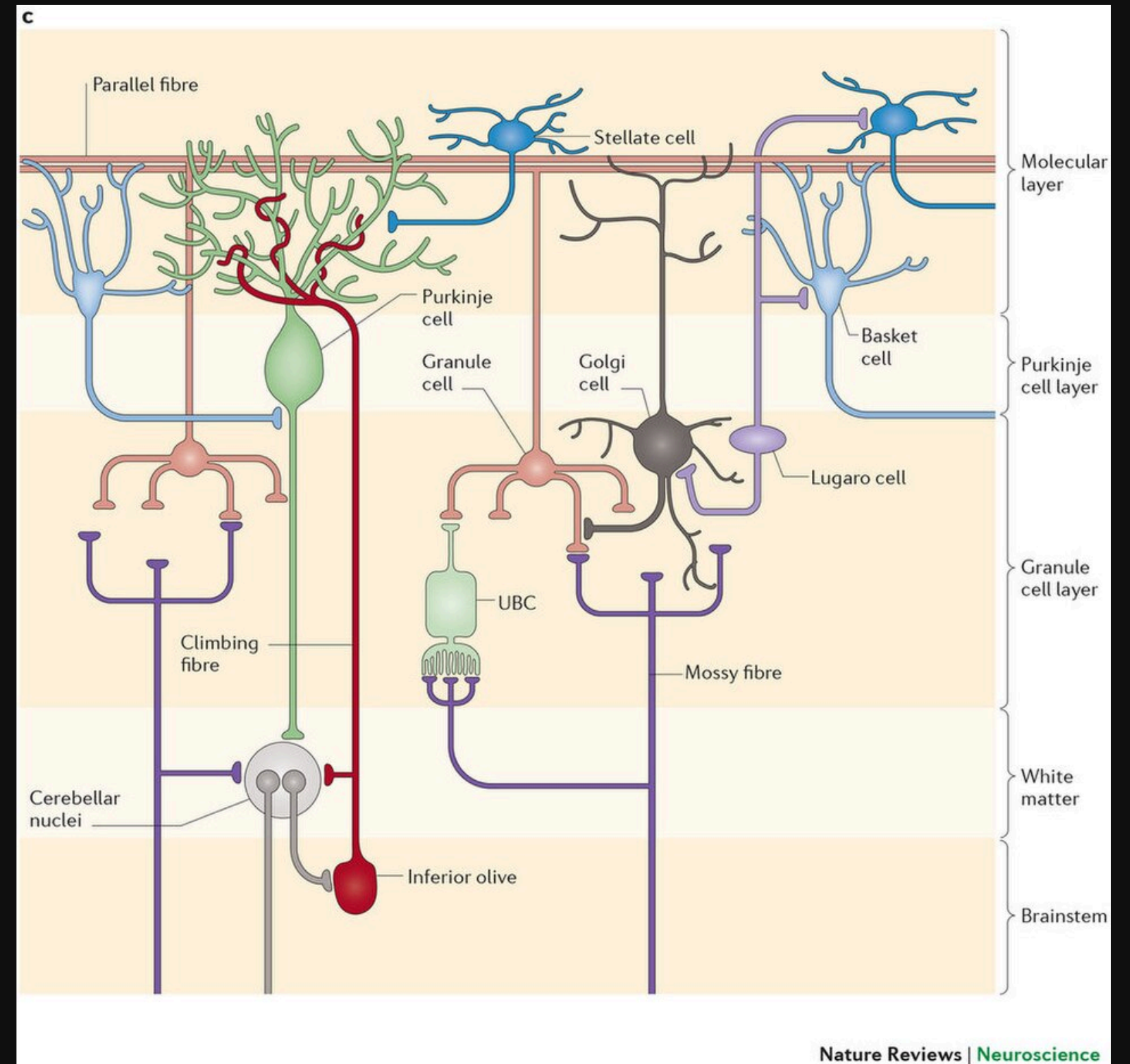
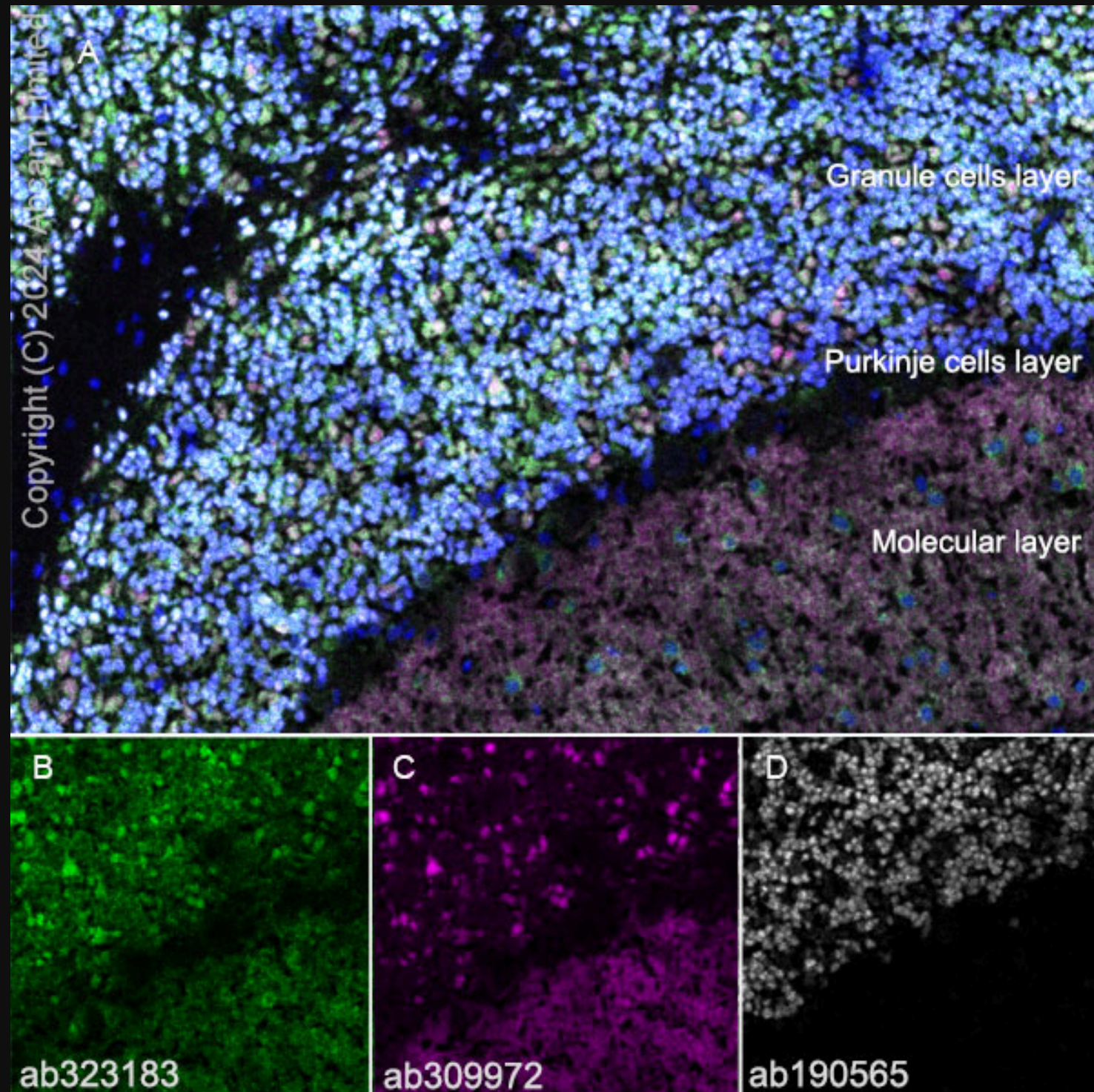
運動指令を発する場所

「予測・誤差修正システム」

小脳の機能

- 筋緊張制御
- 姿勢維持
- 歩行
- 四肢運動の調節
- 計画・実行
- 学習
- 注意
- 言語
- 精密運動
- 作業記憶
- バランス維持
- 眼球運動

小脳のミクロ構造



Nature Reviews | Neuroscience

Source: Abcam, Alexa Fluor® 594 Anti-Synapsin I - Synaptic Marker antibody [EPR23531-50] (ab309972)

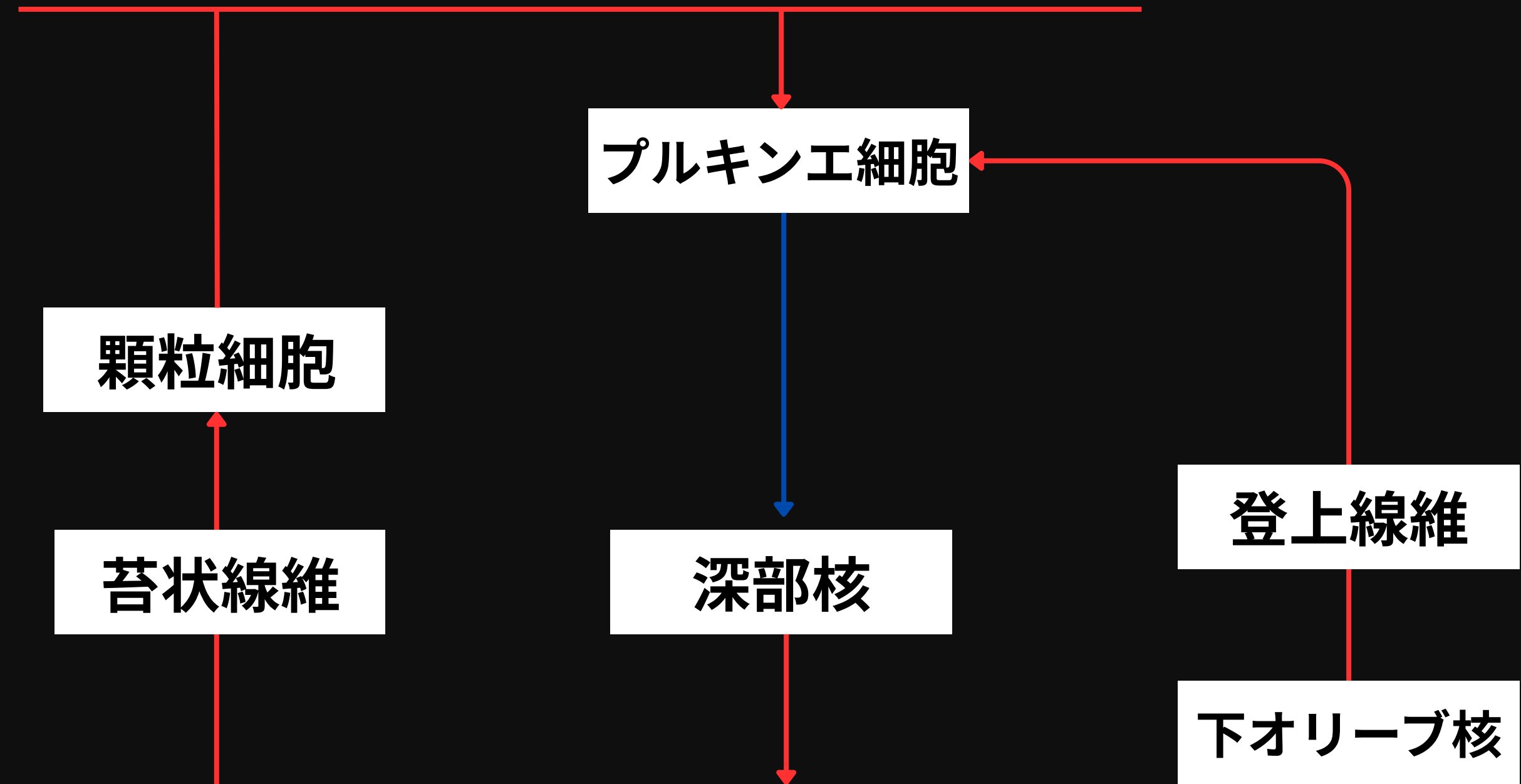
<https://www.abcam.co.jp/products/primary-antibodies/alexa-fluor-594-synapsin-i-synaptic-marker-antibody-epr23531-50-ab309972>

小脳のミクロ構造

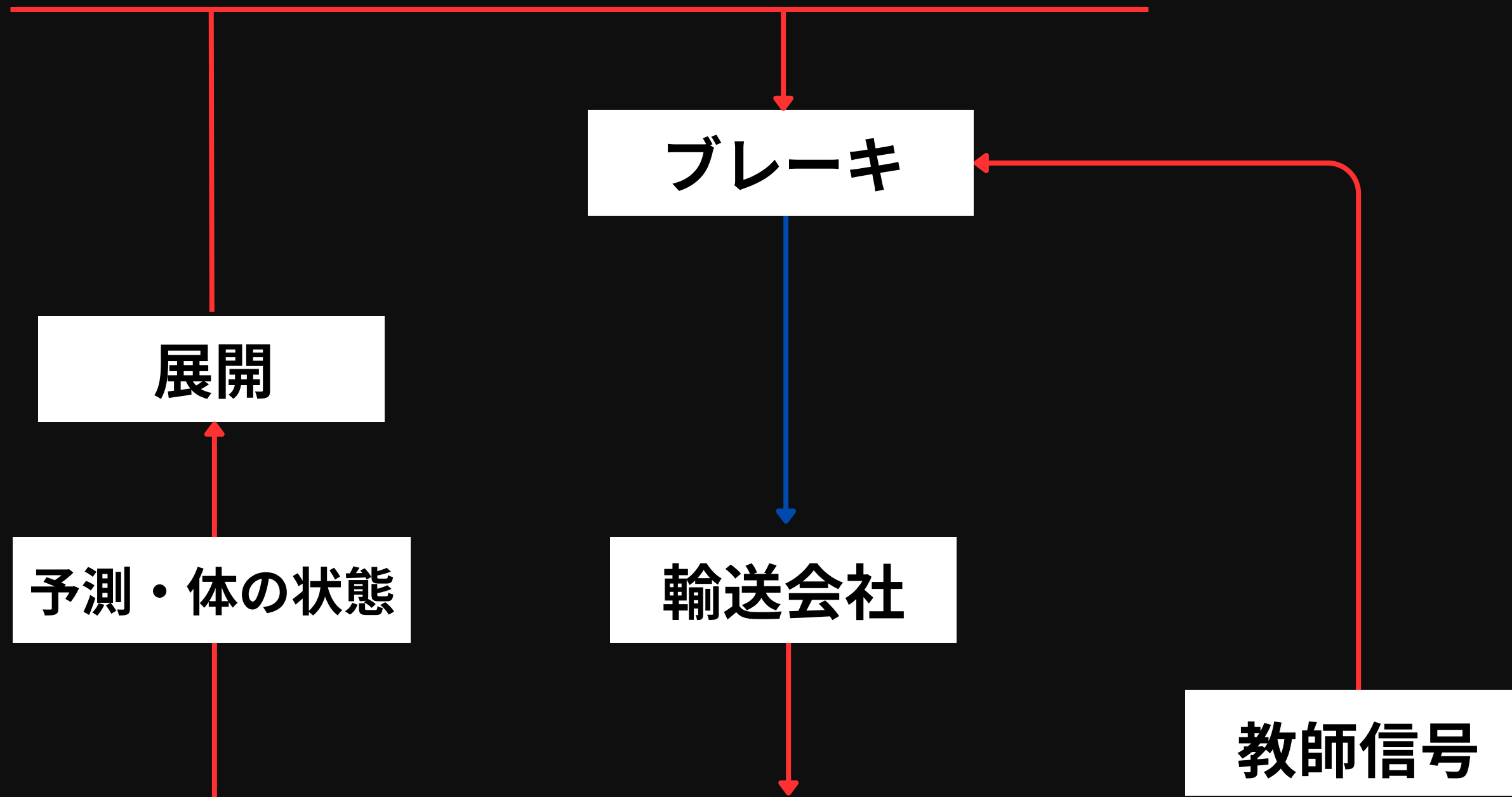
分子層

プルキンエ細胞層

顆粒細胞層



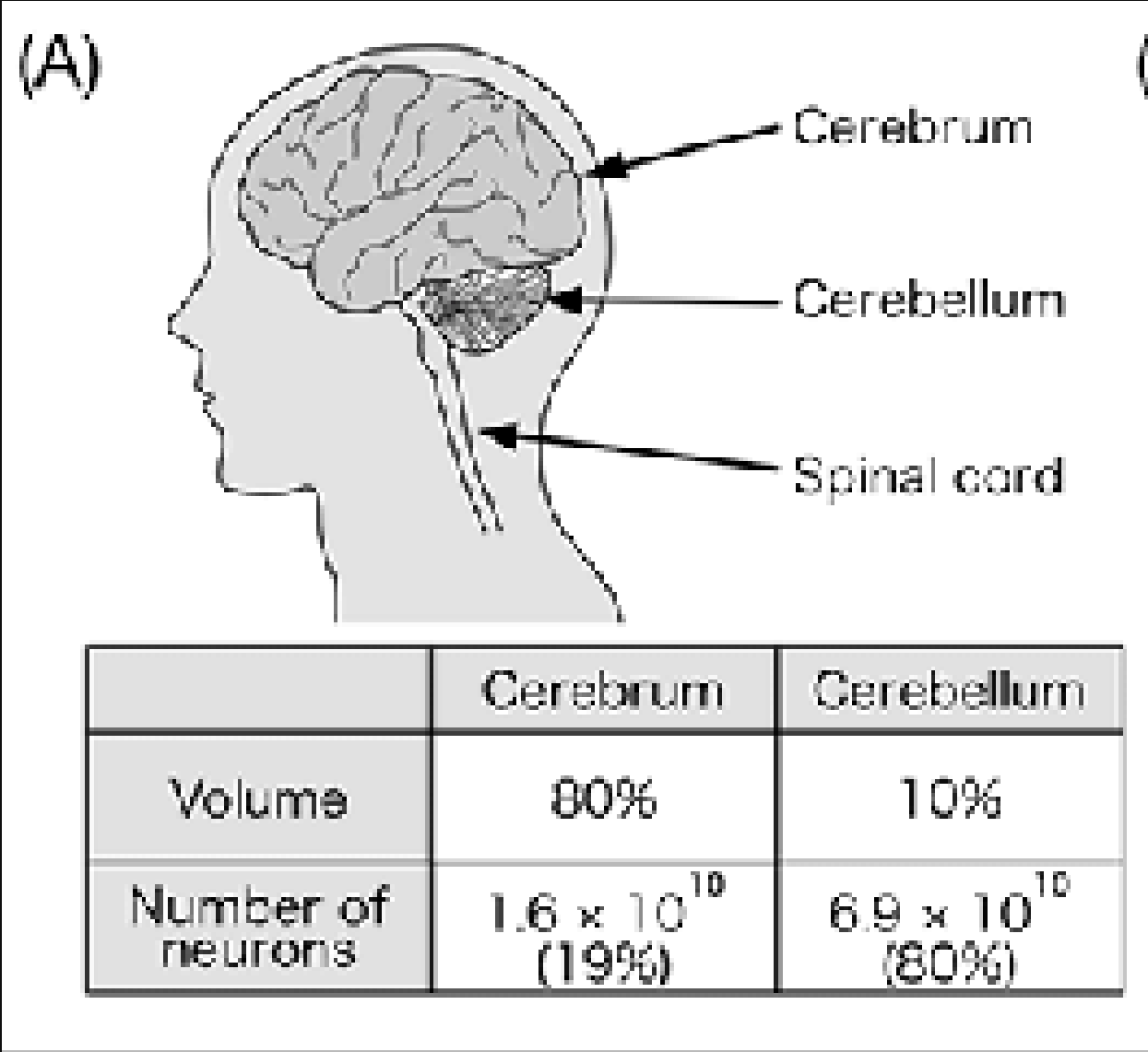
小脳のミクロ構造



顆粒細胞

全脳：約861億ニューロン

- 大脳皮質：約163億ニューロン（全体の約19%）
- 小脳：約690億ニューロン（全体の約80%）



Azevedo, F. A. C., Carvalho, L. R. B., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E. L., Leite, R. E. P., Jacob Filho, W., Lent, R., & Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, 513(5), 532–541.

プルキンエ細胞と登上線維

プルキンエ細胞

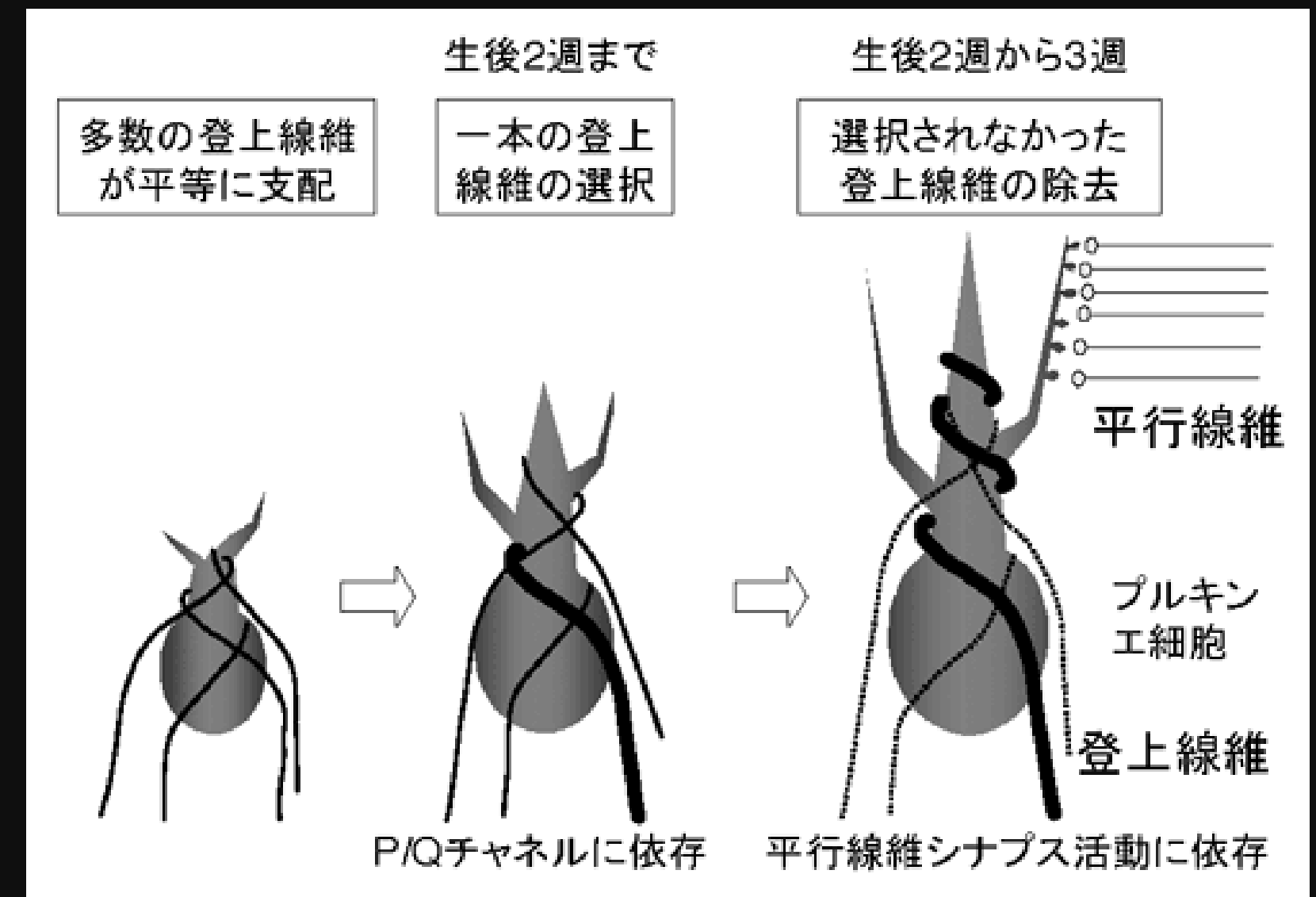
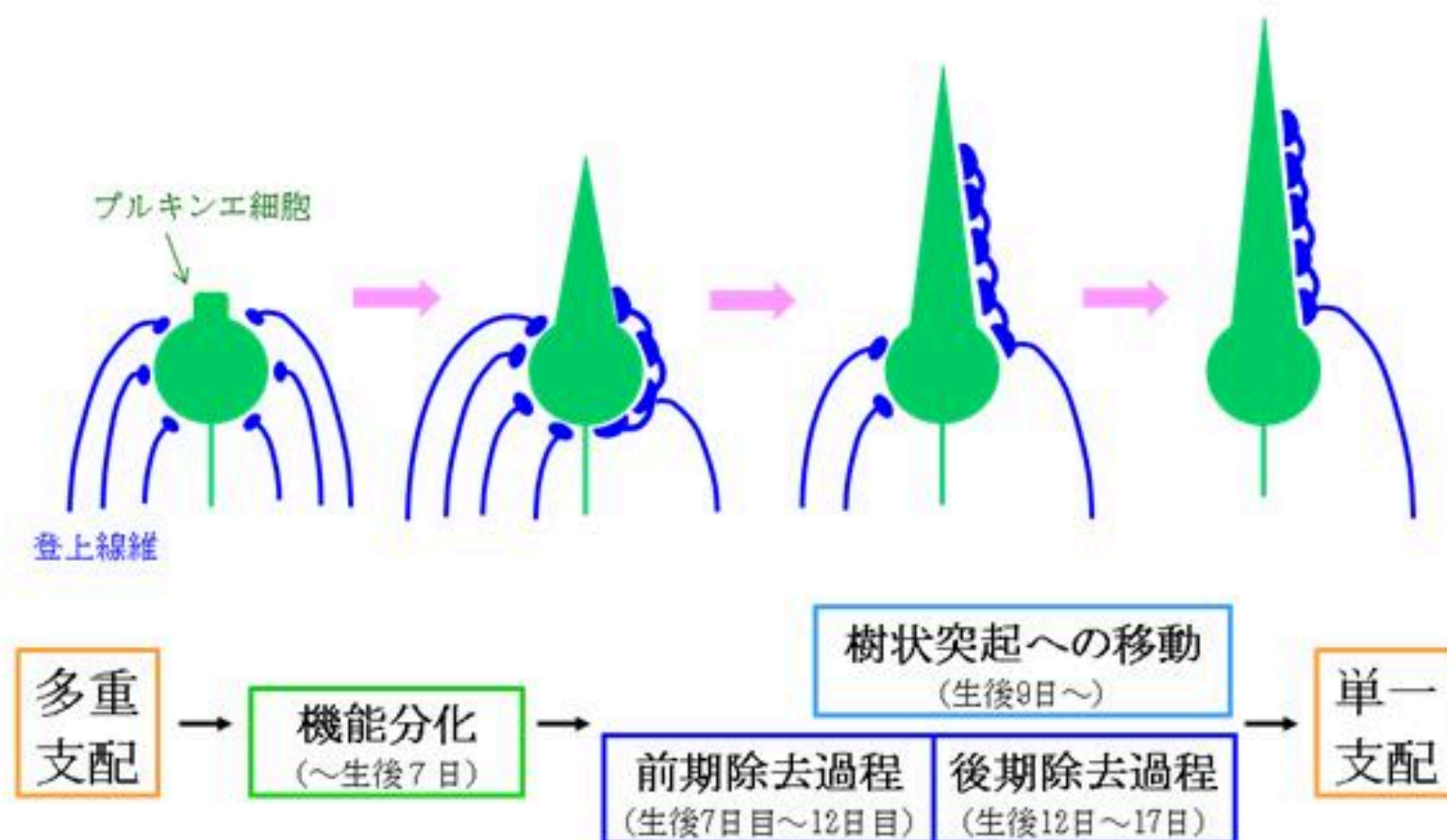
- 顆粒細胞：10万本以上
- 登上線維：1本

登上線維

- 発達初期のプルキンエ細胞は複数の登上線維を受ける
- 活動依存的に1本が強化される
- 弱い登上線維の刈り込み
- 成熟後：1：1

プルキンエ細胞と登上線維

小脳登上線維－プルキンエ細胞シナプスの生後発達



Hashimoto, K., Tsujita, M., Miyazaki, T., Kitamura, K., Yamazaki, M., Shin, H.-S., Watanabe, M., Sakimura, K., & Kano, M. (2011). Postsynaptic P/Q-type Ca^{2+} channel in Purkinje cell mediates synaptic competition and elimination in developing cerebellum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(24), 9987–9992. <https://doi.org/10.1073/pnas.1101477108>

Hashimoto, K., Ichikawa, R., Kitamura, K., Watanabe, M., & Kano, M. (2009). Translocation of a "winner" climbing fiber to the Purkinje cell dendrite and subsequent synapse elimination in developing cerebellum. *Neuron*, 63(5), 640–653. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.002>

小脳と認知機能

友人にLINEを送った

- 過去の経験と現在の状況
 - いつも数時間以内に返ってくる
 - 関係性は良好



返信がない



誤差検知



学習

小脳と機能異常

- **測定障害 (Dysmetria)**
 - 大脳小脳
 - 距離・力・速度の予測
 - 内部モデル
- **運動失調 (Ataxia)**
 - 脊髄小脳
 - 運動協調
- **歩行障害 (Gait disturbance)**
 - 脊髄小脳
 - 姿勢・歩行パターン制御
- **企図振戦 (Intention tremor)**
 - 大脳小脳・脊髄小脳
 - 誤差修正の安定化
- **体幹振戦 (Titubation)**
 - 前庭小脳
 - 姿勢予測・重心制御脳
- **反復運動障害 (Dysdiadochokinesia)**
 - 大脳小脳・脊髄小脳
 - 運動切替・タイミング制御
- **構音障害 (Dysarthria)**
 - 大脳小脳
 - 発話筋群のタイミング制御
- **嚥下障害 (Dysphagia)**
 - 前庭小脳
 - 嚥下協調・運動タイミング
- **眼振 (Nystagmus)**
 - 前庭小脳
 - 視線安定化
 - 前庭眼反射 (VOR) 調整
- **筋緊張低下 (Hypotonia)**
 - 脊髄小脳
 - 筋緊張・姿勢調整
- **認知変化 (CCAS)**
 - 大脳小脳
 - 認知・情動の調整

小脳がないとどうなる？

先天性小脳無形性

- 20代成人
- 症状
 - 歩行失調
 - 構音障害
 - 発達遅延
 - 軽度知的障害

Yu et al. (2015)

A new case of complete primary cerebellar agenesis:
clinical and imaging findings in a living patient.
Brain

片側小脳半球欠損

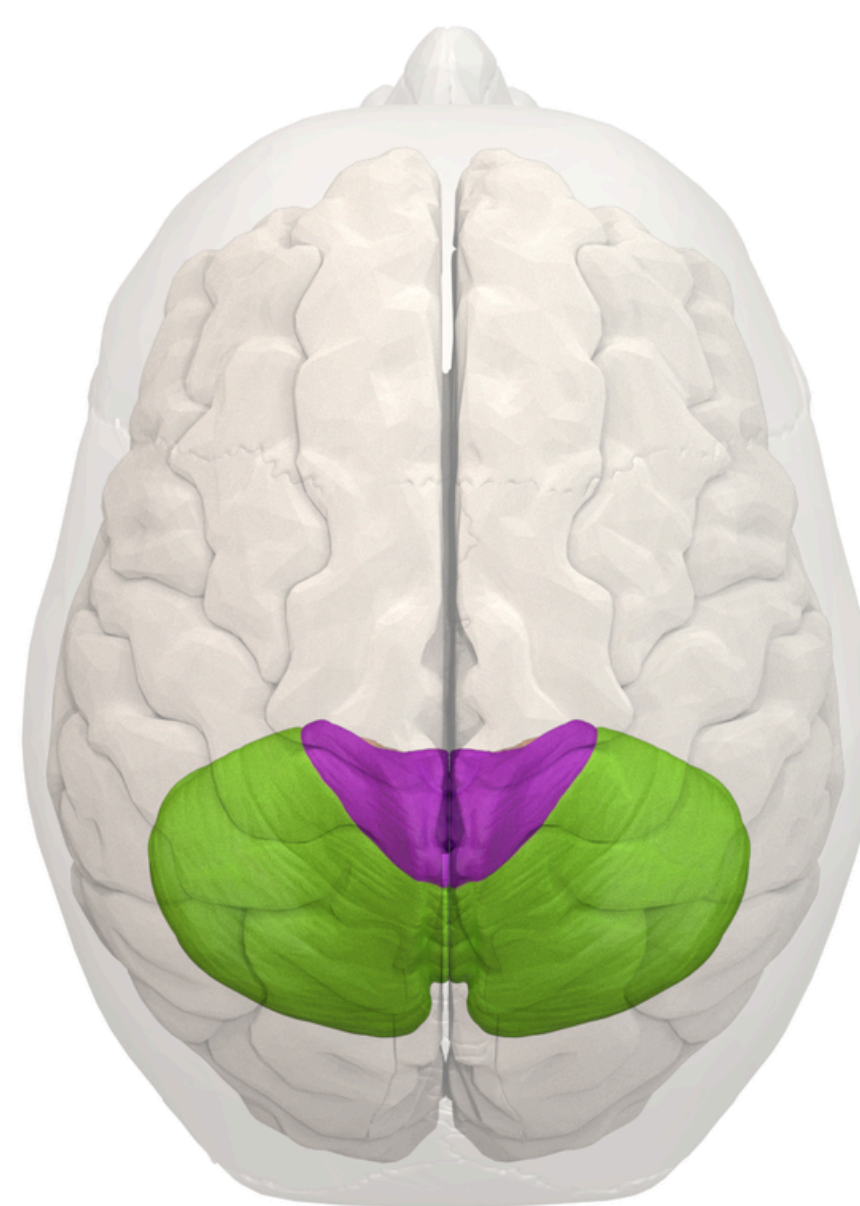
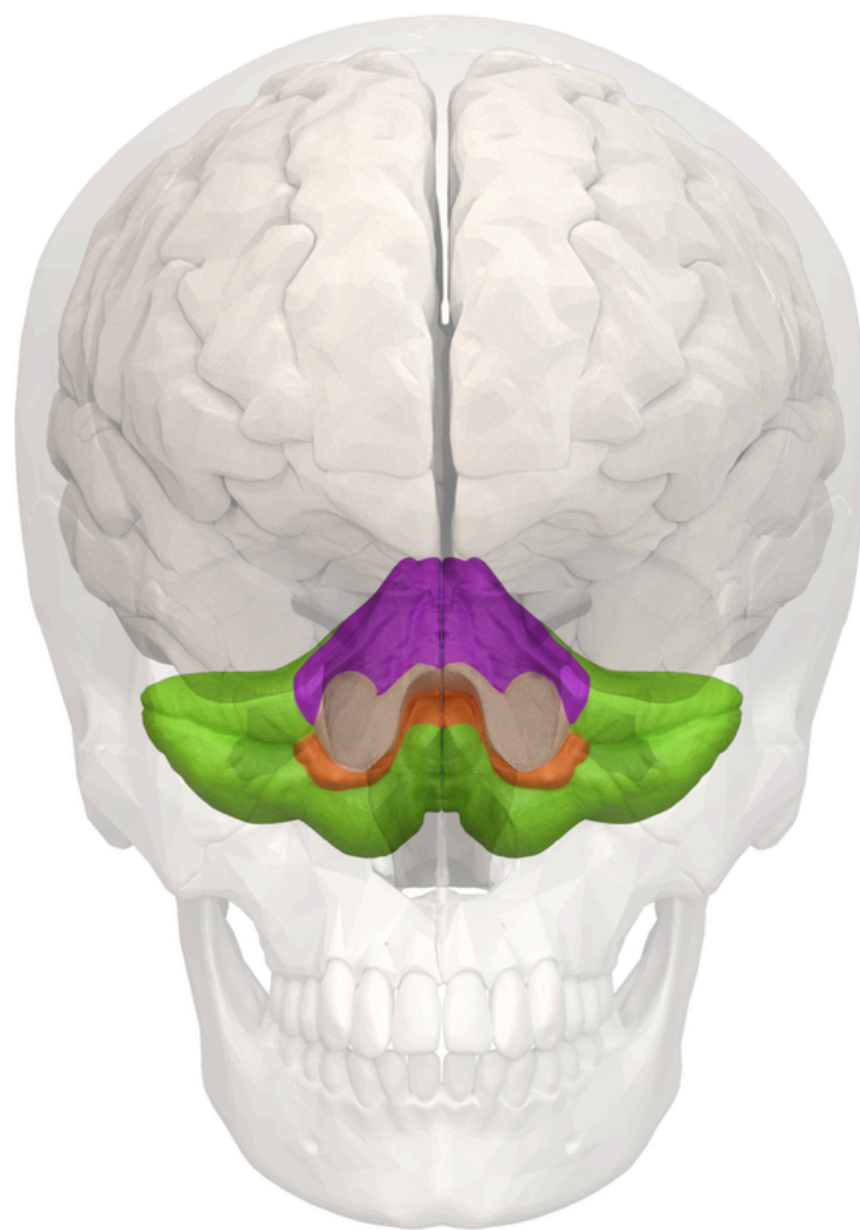
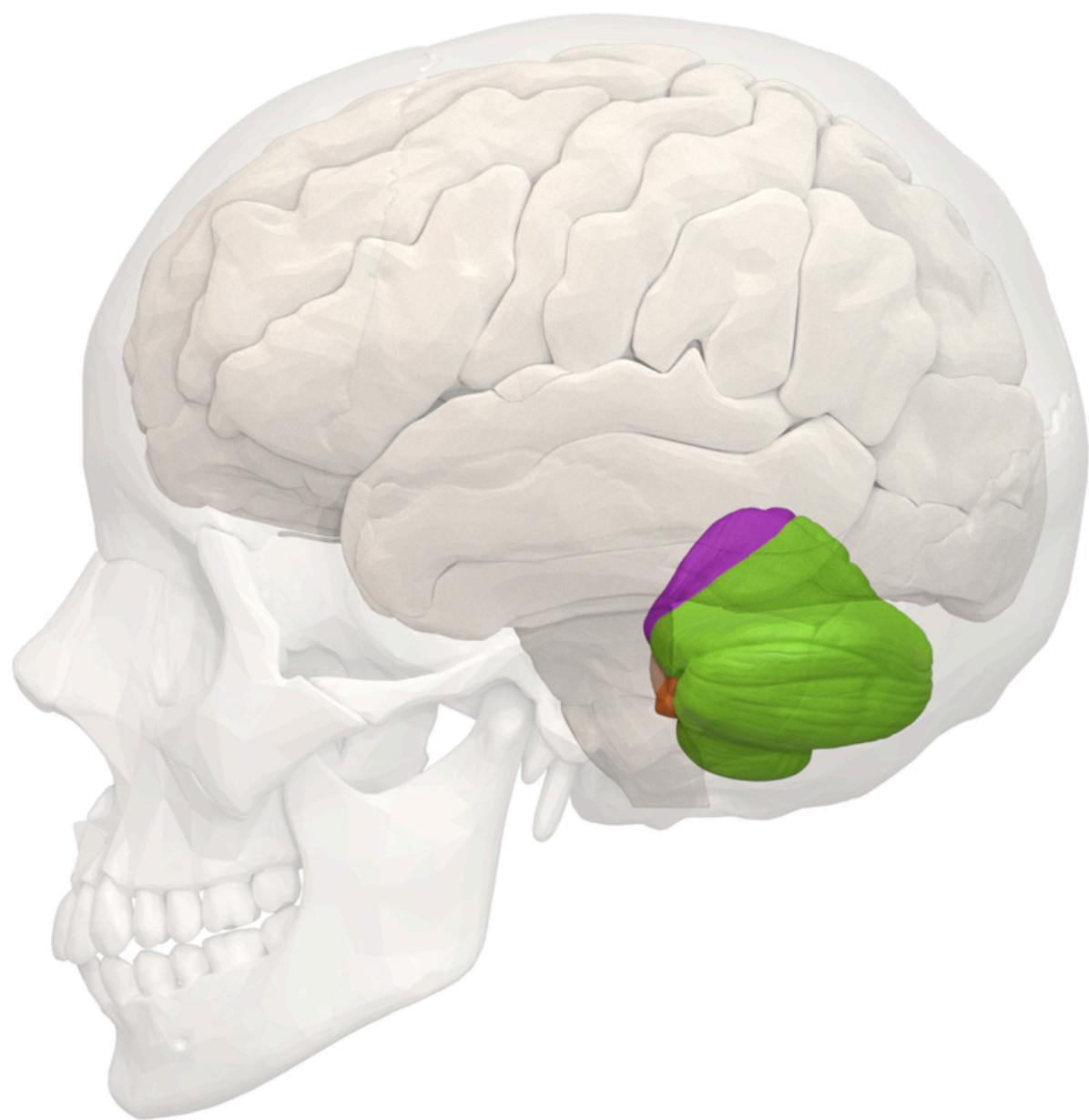
- 30代成人
- 症状
 - 重度運動失調
 - 重度構音障害
 - 測定
 - 反復運動障害
 - IQ低下

Erdogan N, Kocakoc E, Bekar D, Ozturk. Unilateral
absence of cerebellar hemisphere: a case report.
Neuroradiology. 2002 Jan;44(1):49-51. doi:
10.1007/s002340100679. PMID: 11942500.

小脳梗塞後に出現した 小脳認知情動症候群

- 成人男性
- 小脳梗塞
 - 後部小脳
 - 外側半球
- 症状
 - 運動失調
 - 協調運動障害
 - 実行機能障害
 - 記憶障害
 - 行動変化
 - 言語

Paulus KS, Magnano I, Conti M, Galistu P,
D'Onofrio M, Satta W, Aiello I. Pure post-stroke
cerebellar cognitive affective syndrome: a case
report. Neurol Sci. 2004 Oct;25(4):220-4. doi:
10.1007/s10072-004-0325-1. PMID: 15549508.



小脳

小脳

運動協調、タイミング、誤差修正、予測制御、認知補正

振戦、眼振、感覚過敏、運動過補正

運動失調、測定障害、平衡障害、認知協調障害

- 運動協調
- タイミング制御
- 誤差修正
- 予測制御
- 平衡・姿勢制御
- 眼球運動調整
- 運動学習
- 感覚運動統合
- 認知・情動補正
- 過活動：振戦・眼振・感覚過敏・運動過補正
- 低活動：運動失調・測定障害・平衡障害
- 認知協調障害（dysmetria of thought）

大脳基底核

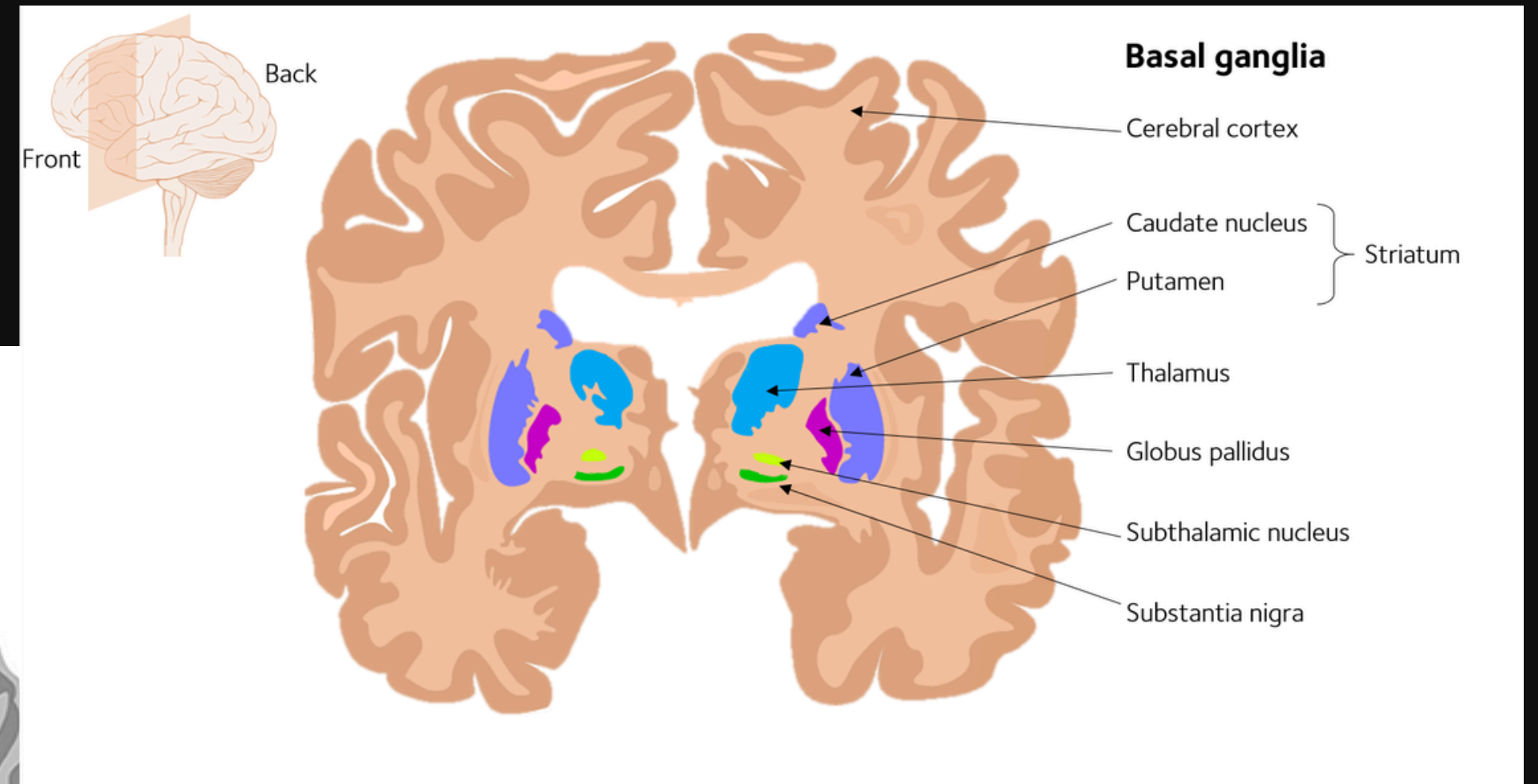
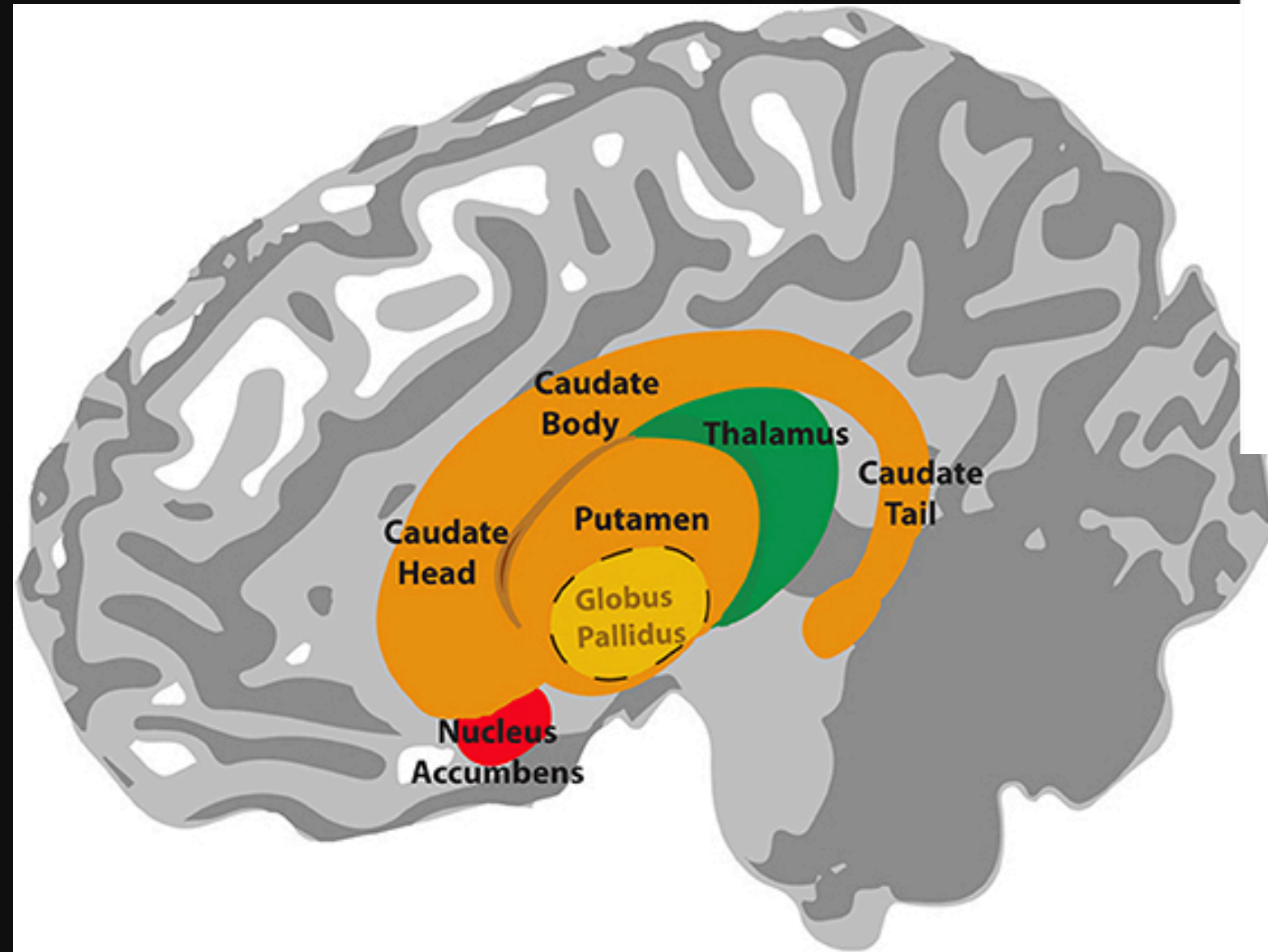
大脳基底核

運動選択、抑制、習慣化、行動選択

ジスキネジア、チック、衝動性、舞踏運動

無動、固縮、動作開始困難、パーキンソニズム

- 運動選択
- 不要運動抑制
- 行動ゲーティング
- 習慣化
- 報酬学習
- 運動開始制御
- 認知・情動ループ
- ドーパミン依存性調節
- 過活動：ジスキネジア・チック・舞踏運動
- 衝動性・強迫傾向
- 低活動：無動・固縮・動作開始困難
- パーキンソニズム



線条体 (Striatum)

- 尾状核 (Caudate)
 - 認知・行動入力
- 被殻 (Putamen)
 - 運動・感覚入力

淡蒼球 (Globus pallidus)

- GPi
 - 視床を抑制
- GPe
 - GPiの出力調整

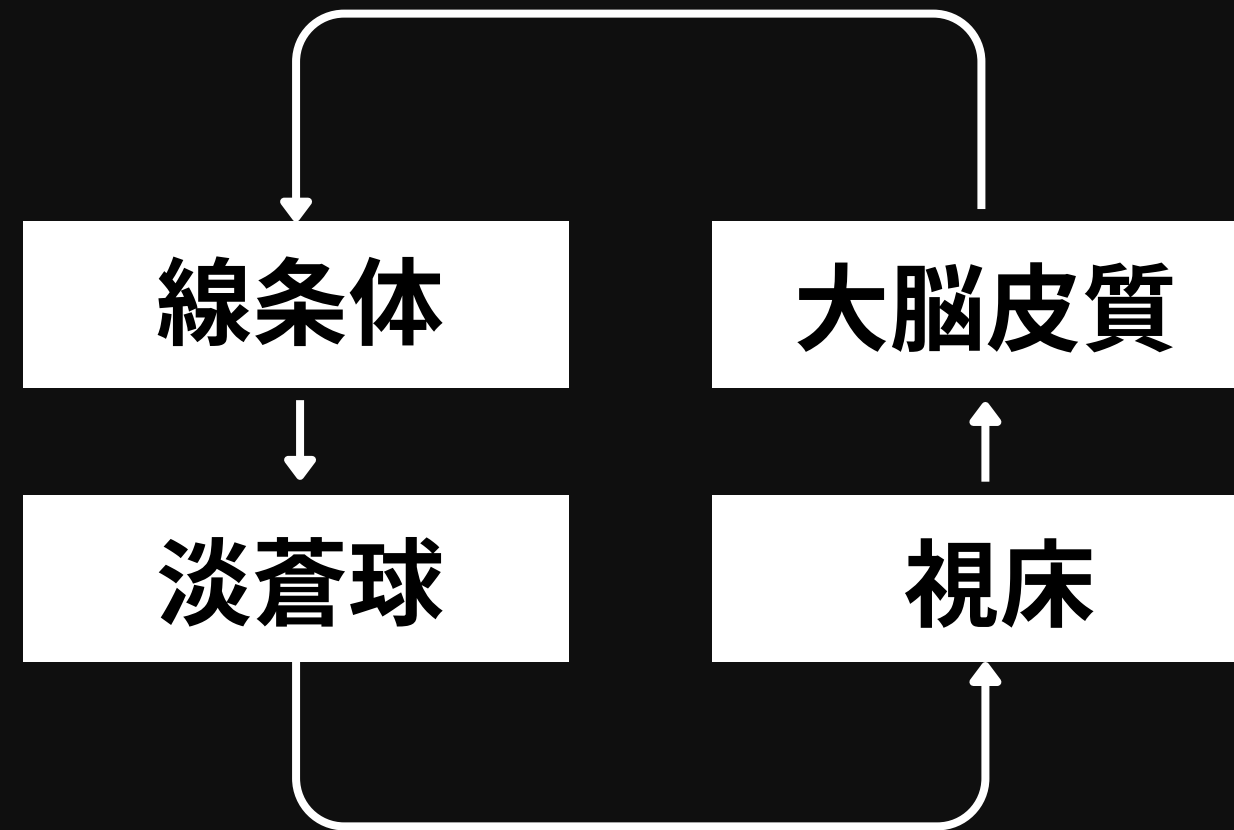
視床下核 (Subthalamic nucleus)

- 間接路の出力促進

黒質 (Substantia nigra)

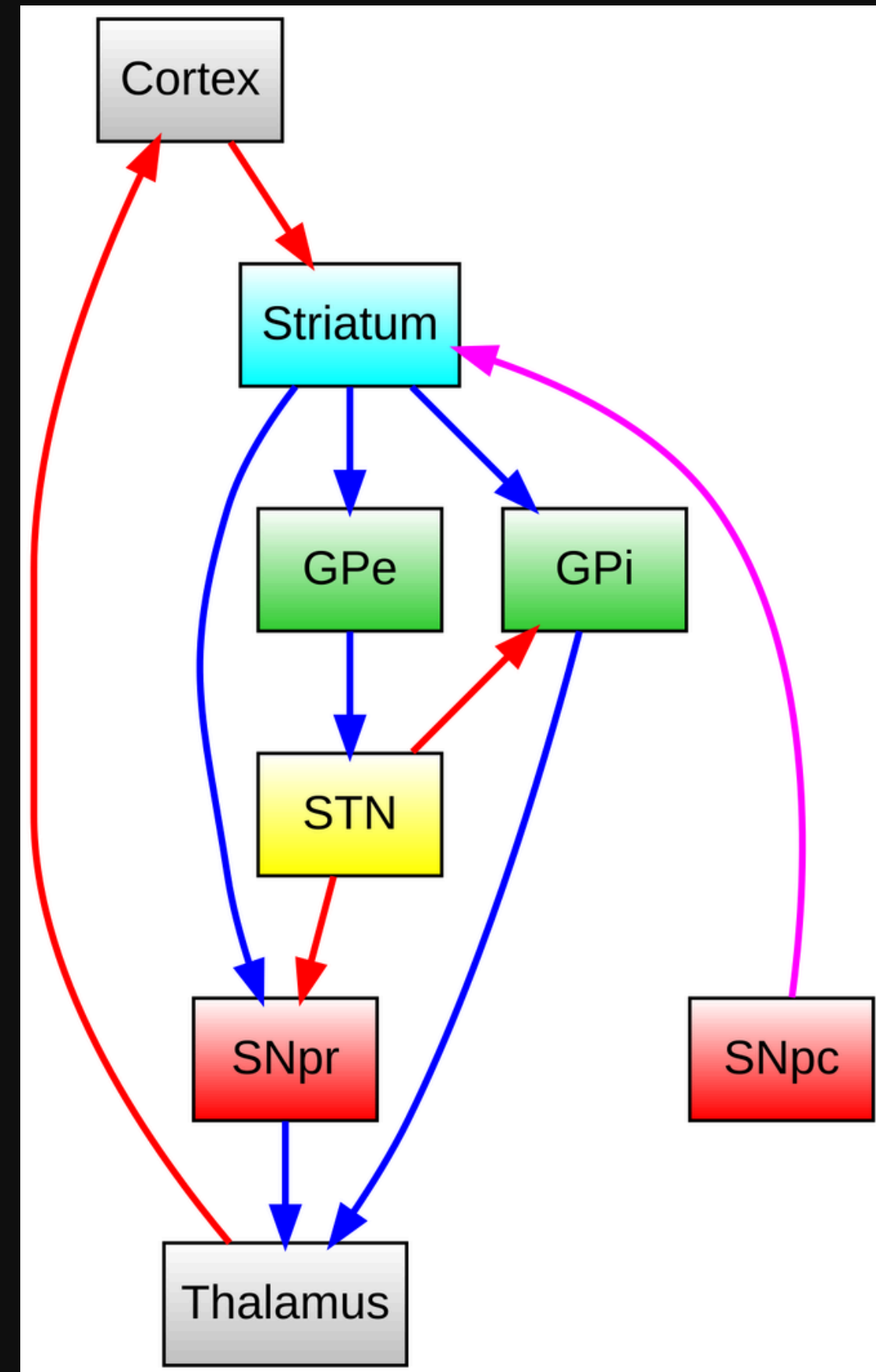
- SNc
 - ドーパミン供給
- SNr
 - 出力調整

皮質—線条—視床—皮質ループ（CSTC circuit）

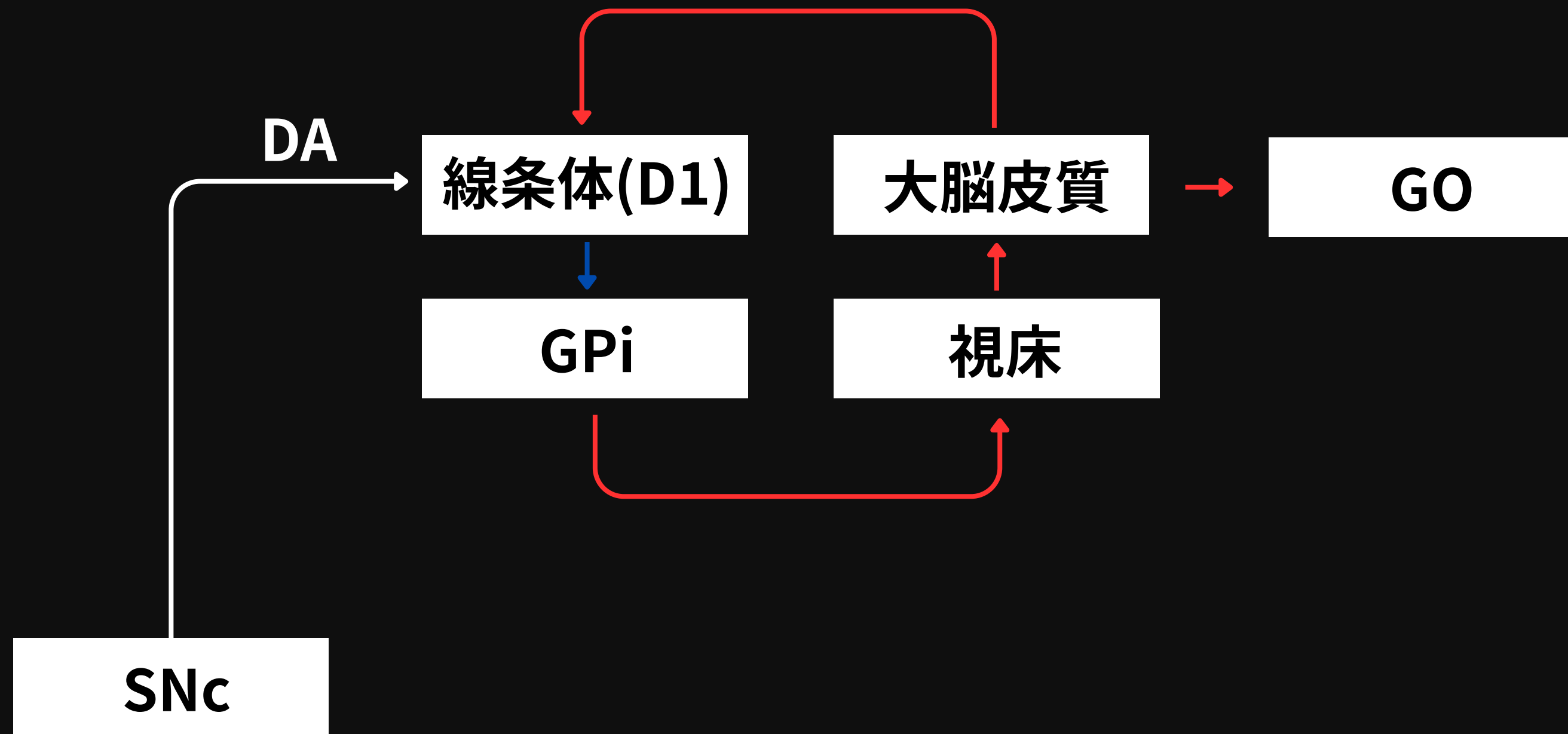


3つの回路

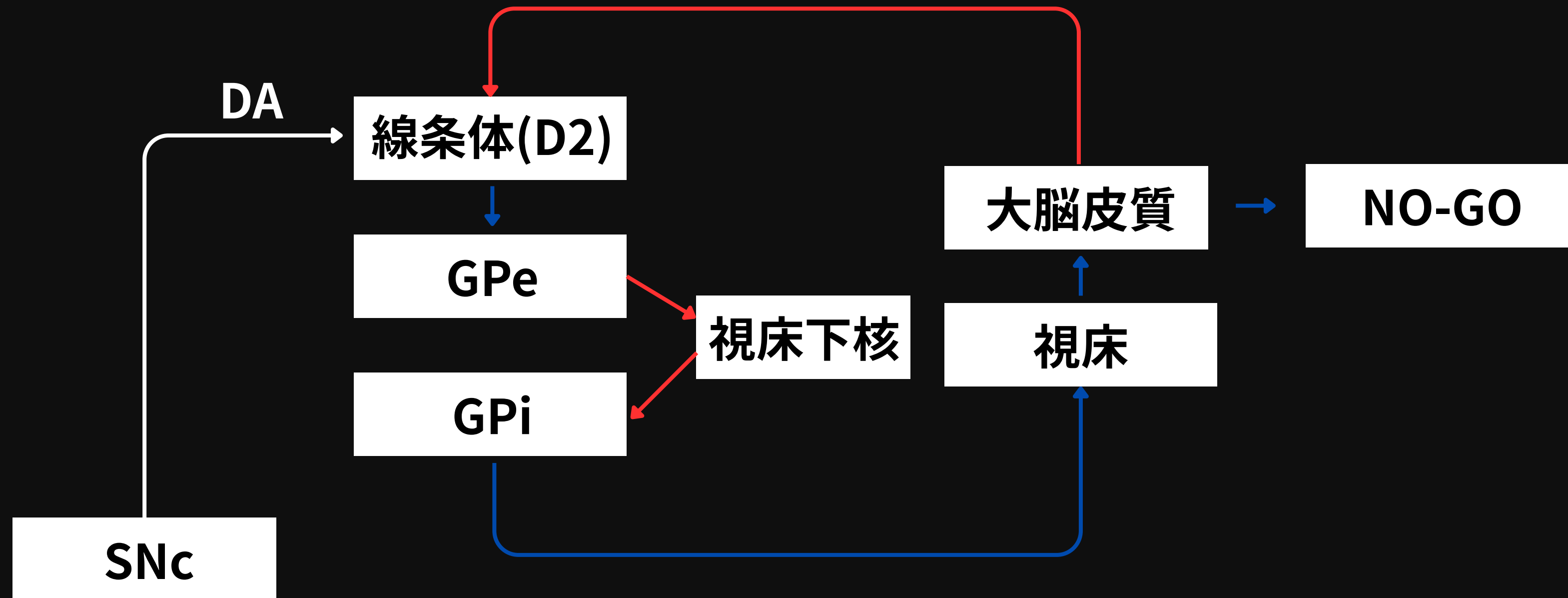
- 直接路
- 間接路
- ハイパーダイレクト路



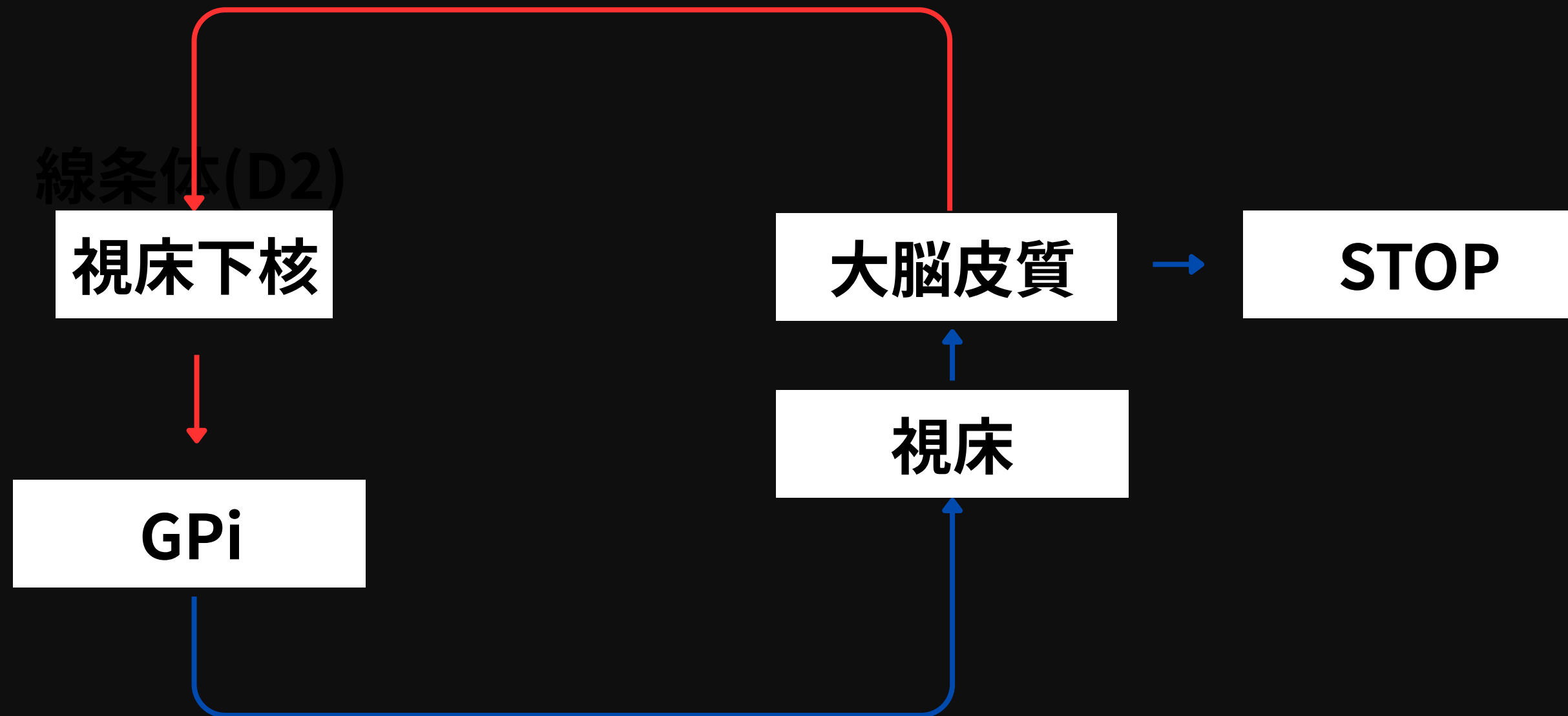
直接路



間接路

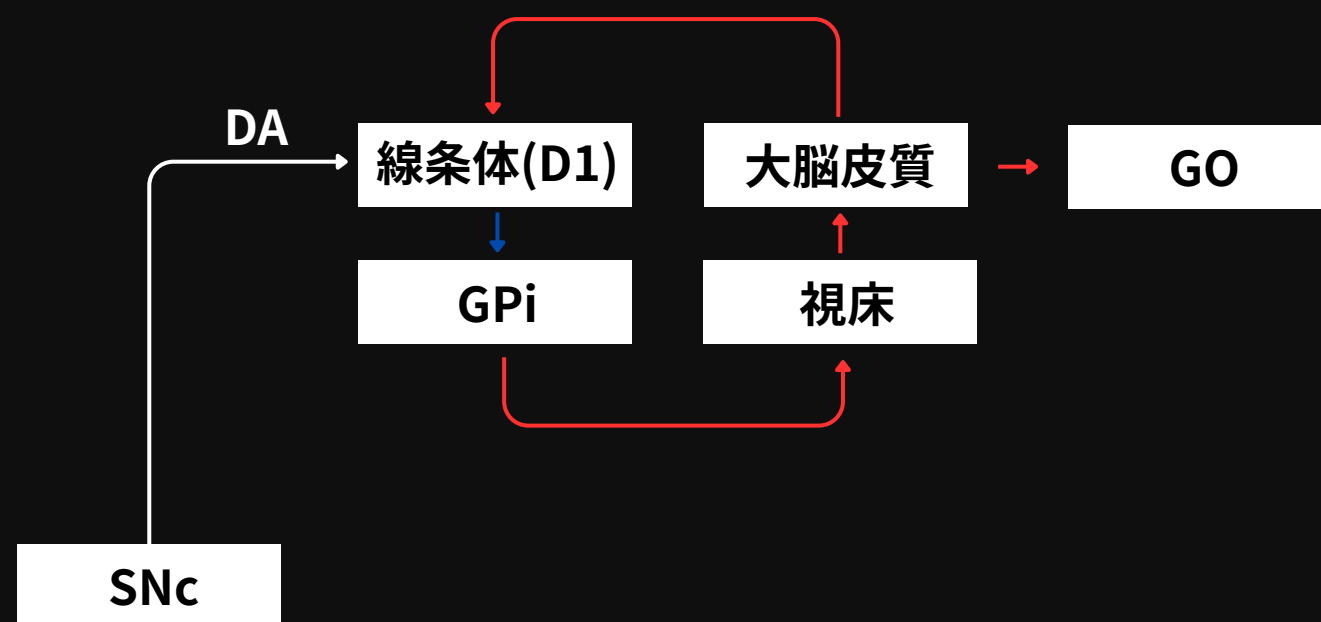


ハイパーダイレクト路

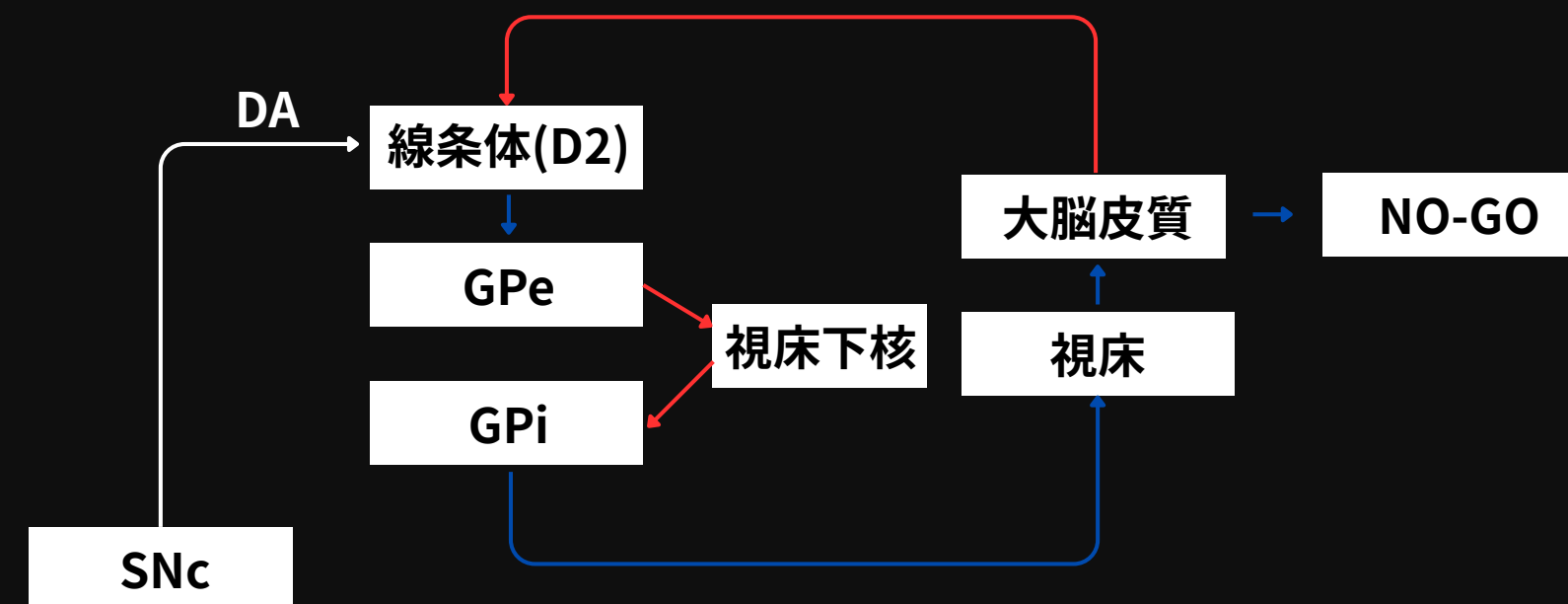


ドーパミン

直接路



間接路

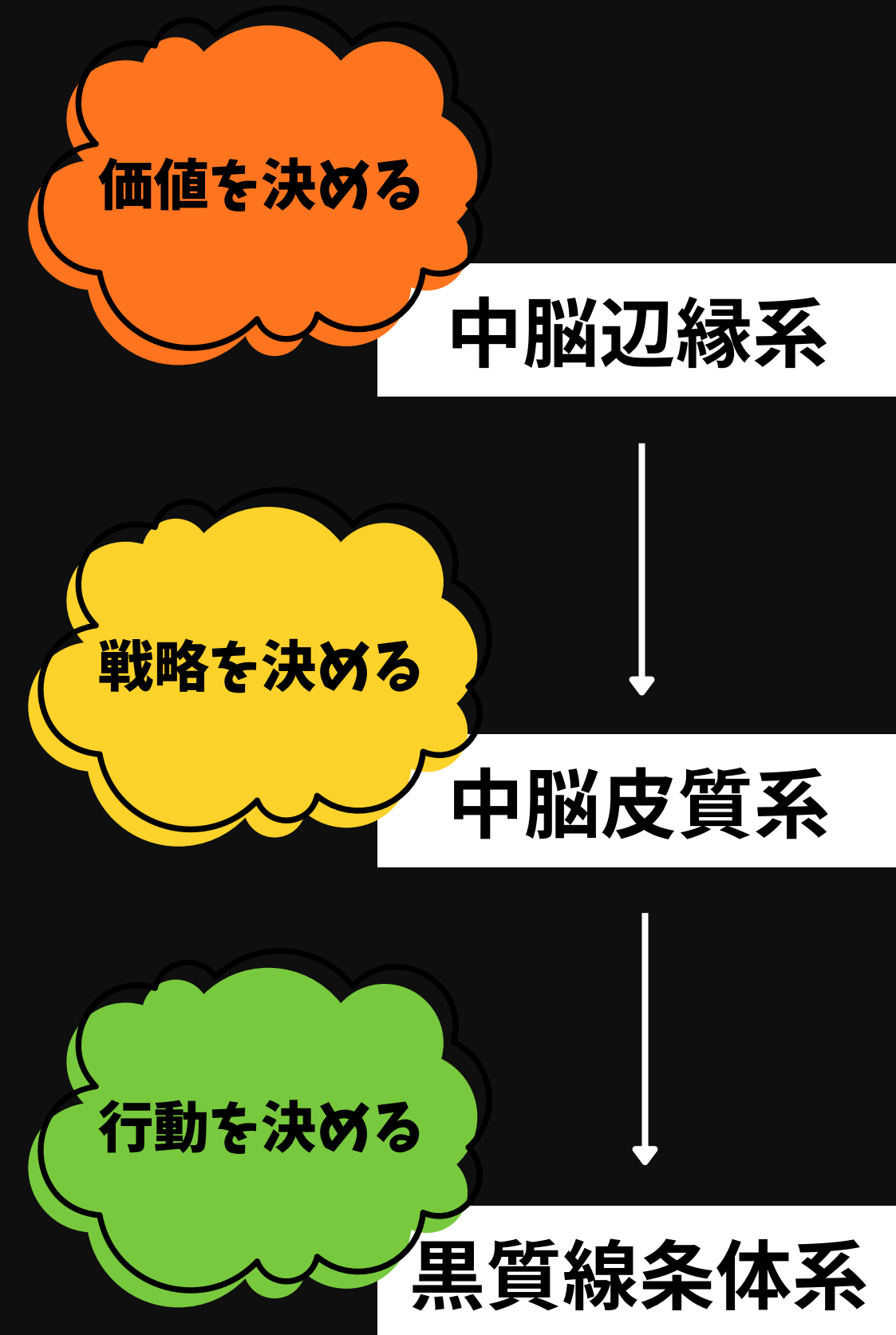


行動選択における「競合」

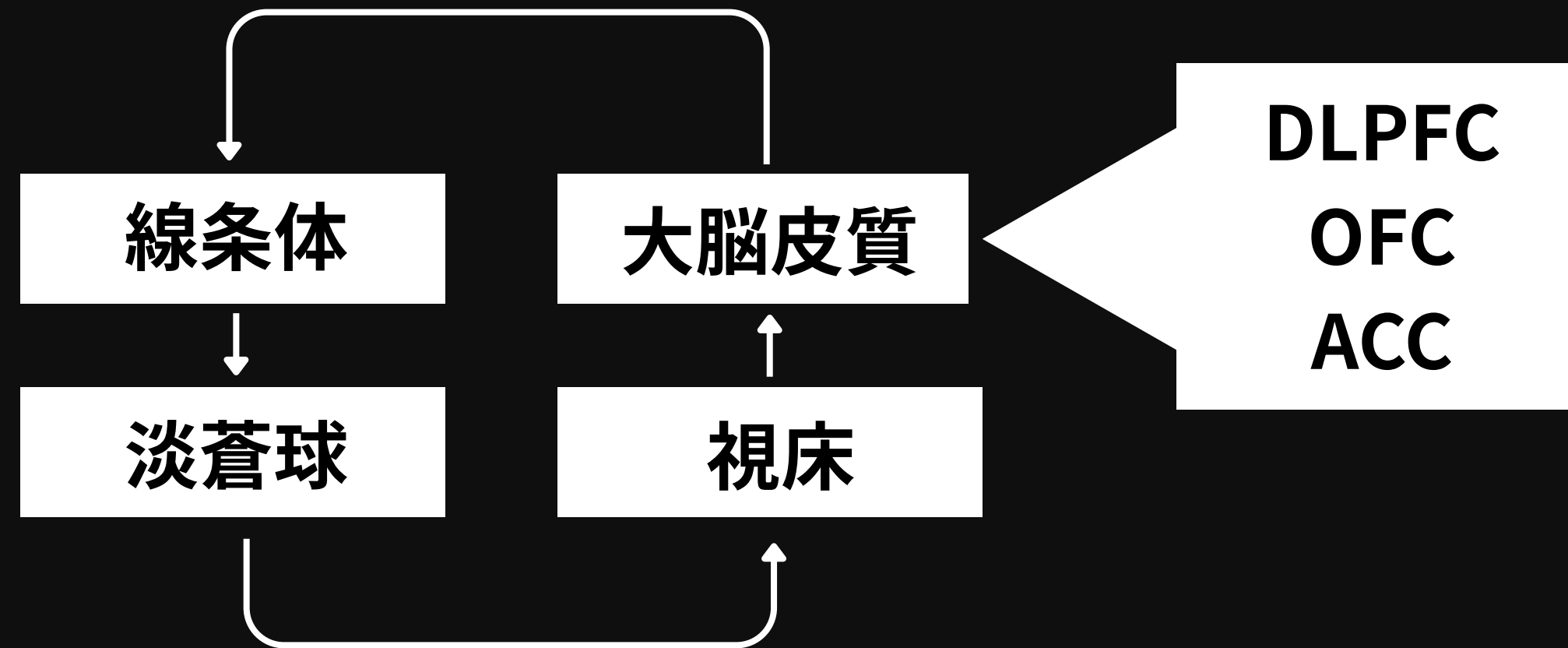
大脳皮質は常に行動候補を複数持っている
でも、行動できるのは基本的に1つ

↓
競合

↓
勝者選択

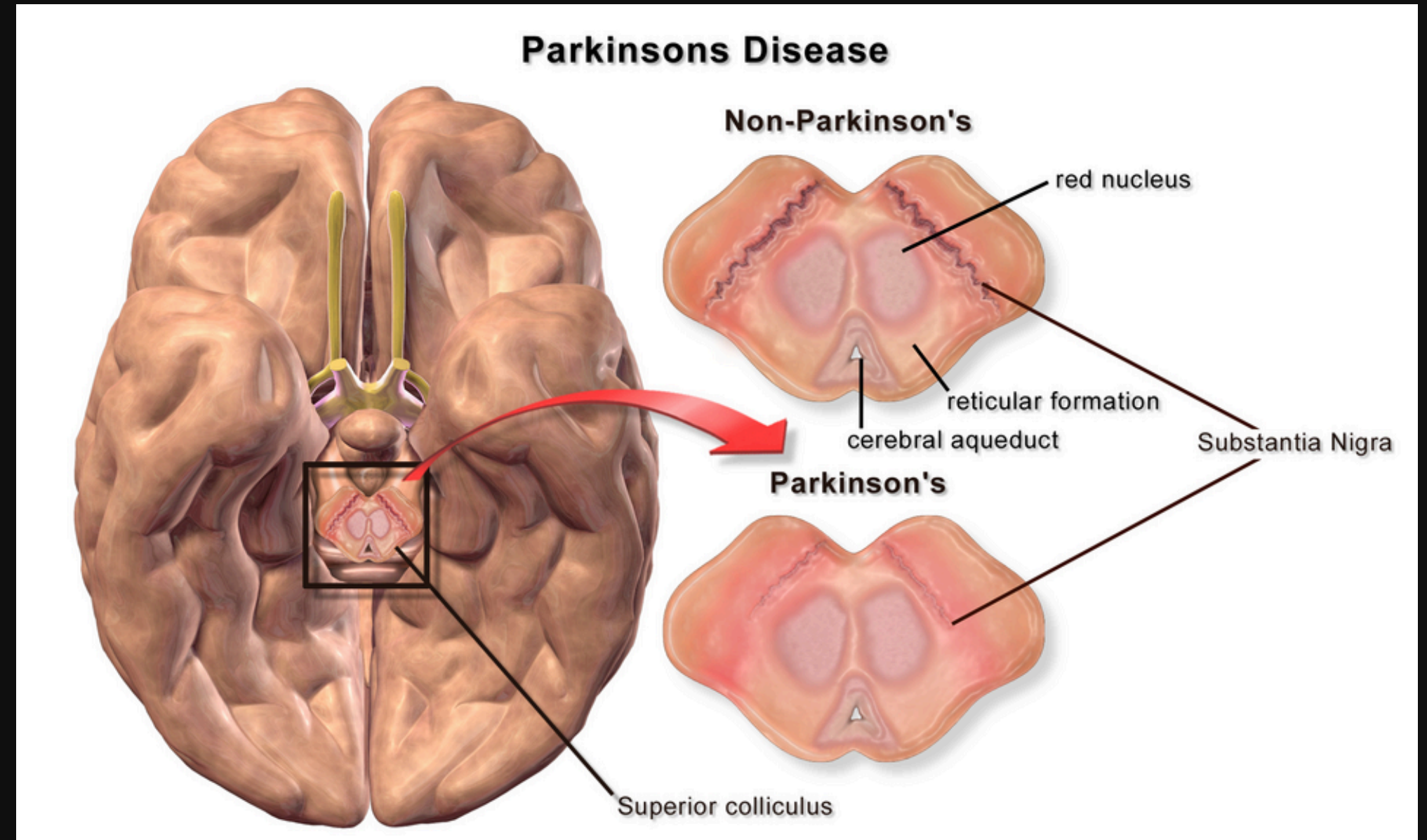


情動・認知ループ



パーキンソン病

SNcの神経変性
↓
ドーパミン↓
↓
直接路↓・間接路↑
↓
皮質活動↓



パーキンソニズム

- 動作緩慢 (Bradykinesia)
- 低運動 (Hypokinesia)
- 無動 (Akinesia)
- 安静時振戦 (Resting Tremor)
- 筋強剛 (Rigidity)
- 姿勢反射障害 (Postural Instability)
- 歩行障害；小刻み歩行 (Shuffling Gait)
- 仮面様顔貌 (Masked Facies)
- 小字症 (Micrographia)
- 構音障害 (Hypophonia)

パーキンソン病

- 嗅覚低下
- 自律神経障害
 - 便秘
- RBD（REM睡眠行動障害）
- 抑うつ・不安
- 認知機能障害

ハンチントン病

間接路のD2ニューロン↓



間接路↓



皮質活動↑

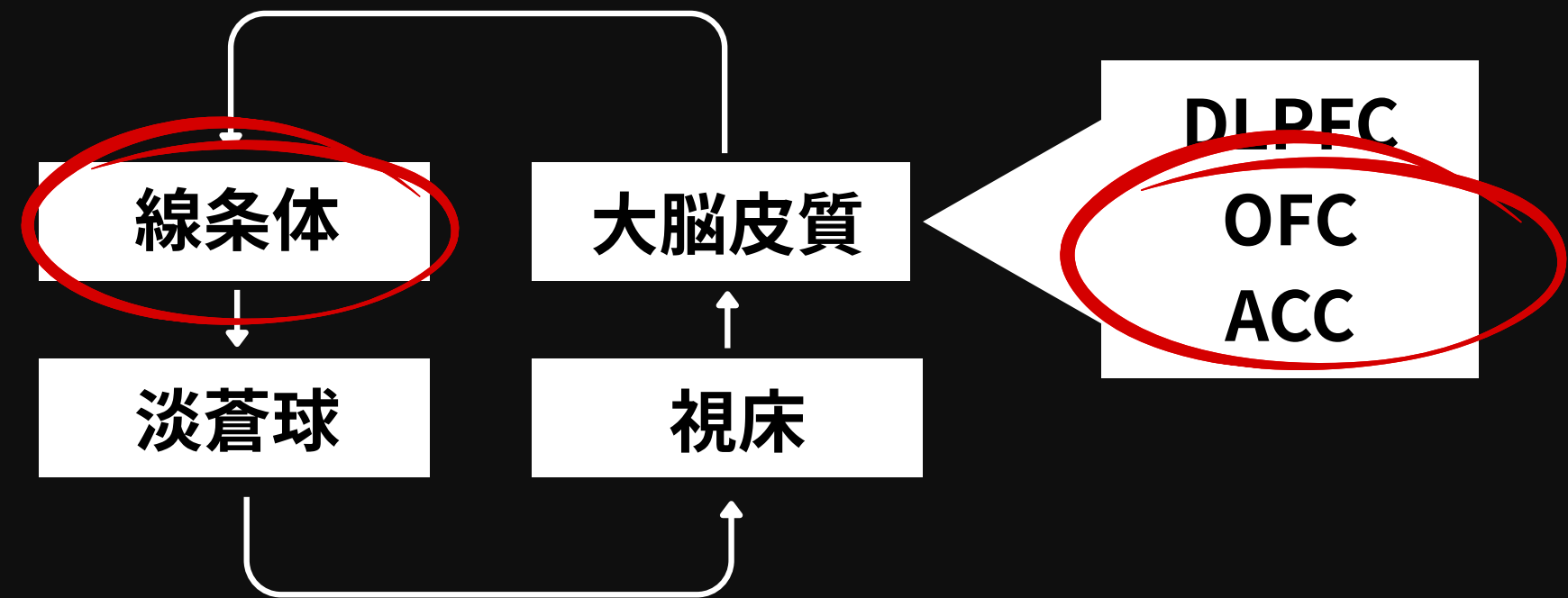


不随意運動

- 舞踏運動 (Chorea)
- ジストニア (Dystonia)
- 眼球運動障害
- 実行機能障害
- 注意障害
- 抑うつ
- 易刺激性 (Irritability)
- 衝動性
- 自殺リスク↑

OCD（強迫性障害）

- OFC/ACCの過活性
- 尾状核の活動/回路異常
- セロトニン↓
- ドーパミン↑
 - 直接路↑/間接路↓
- 「完了感」不足



依存症

ドーパミン ≠ 快樂物質

ドーパミンを枯渇させると

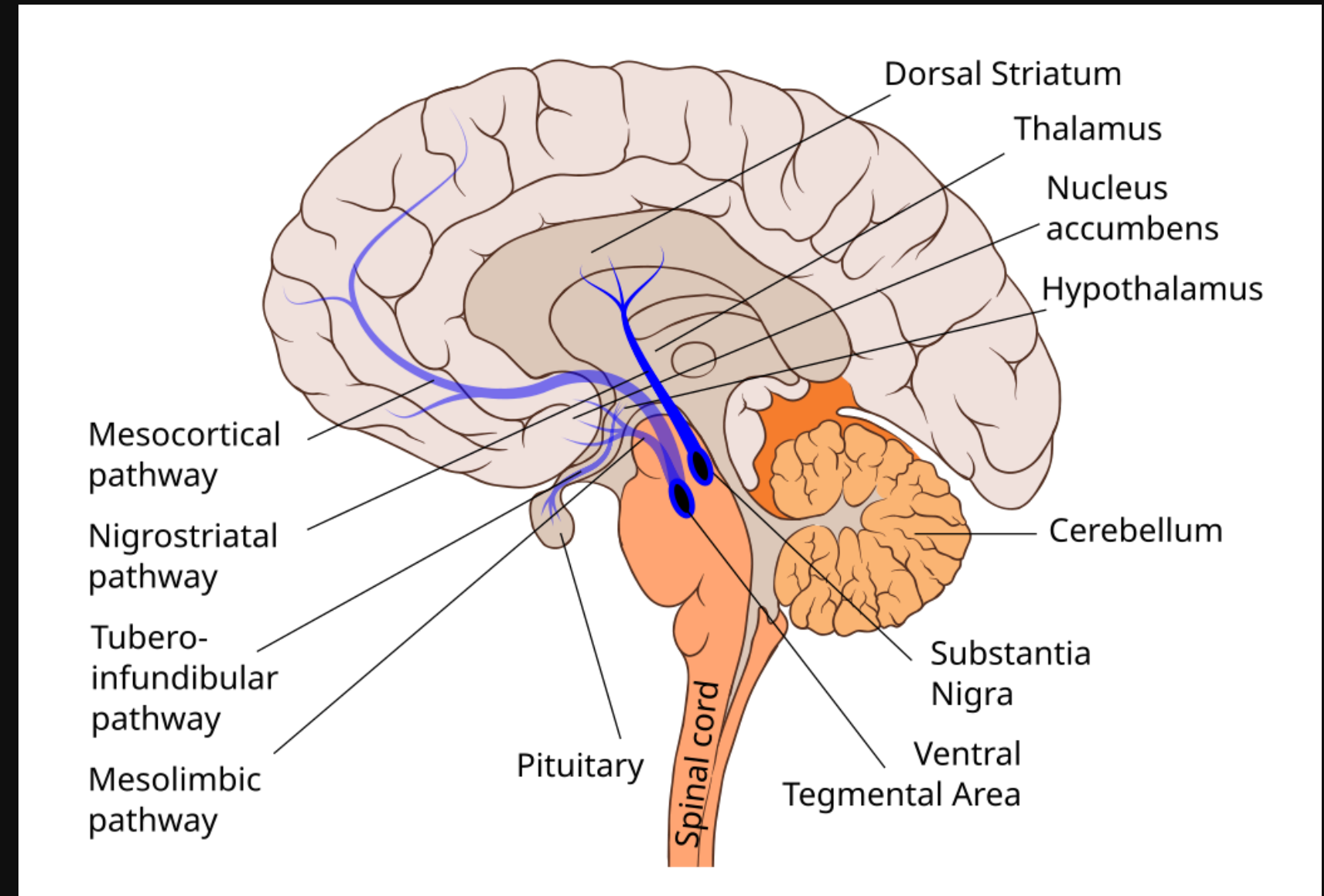
- 快樂(Liking)は残る
- 欲求(Wanting)は消える

Berridge, K. C. (2007). The debate over dopamine's role in reward: The case for incentive salience. *Psychopharmacology*, 191(3), 391–431.

VTA

- 「報酬予測誤差」
 - 予測よりも↑→ドーパミン↑
 - 予測通り→変化なし
 - 予測よりも↓→ドーパミン↓

中脳辺縁系・中脳皮質系



依存症

依存性物質

- ドーパミンによる価値計算システムを薬学的にハイジャックする

VTAを異常刺激

- コカイン
- 覚醒剤
- ニコチン
- アルコール
- オピオイド

報酬系 ↑ ↑ ↑



異常学習



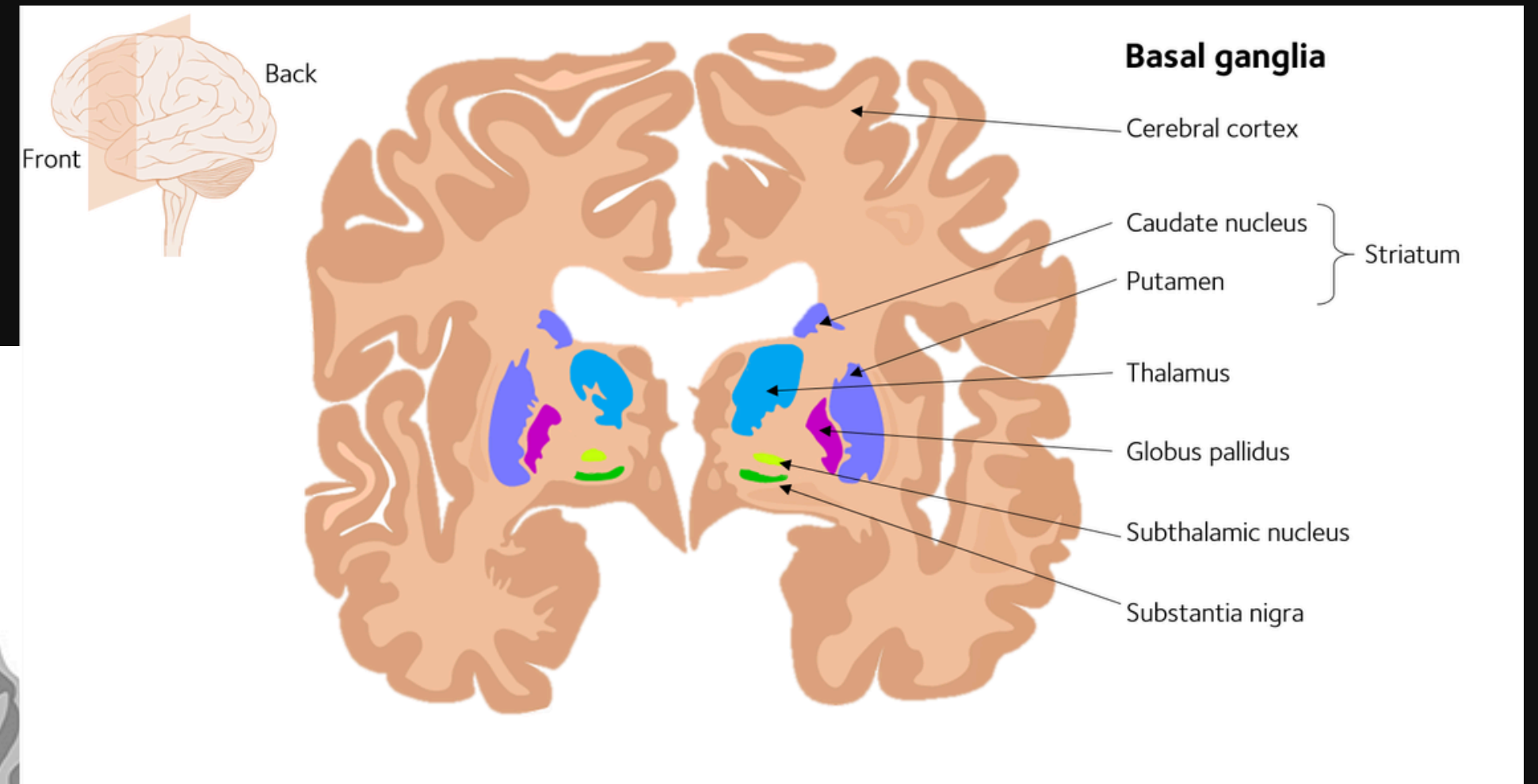
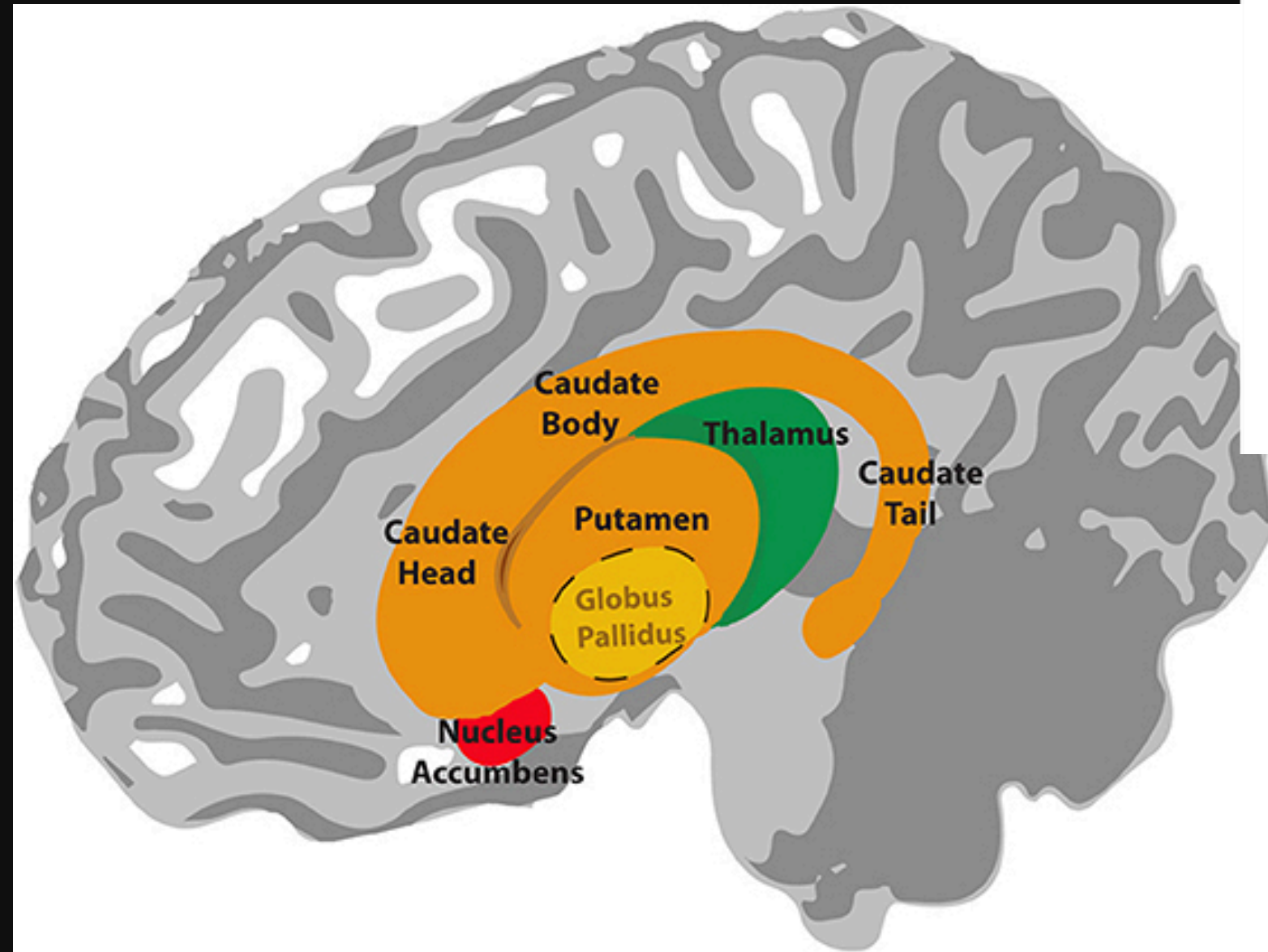
過剰欲求



習慣化



依存症



大脳基底核

大脳基底核

運動選択、抑制、習慣化、行動選択

ジスキネジア、チック、衝動性、舞踏運動

無動、固縮、動作開始困難、パーキンソニズム

- 運動選択
- 不要運動抑制
- 行動ゲーティング
- 習慣化
- 報酬学習
- 運動開始制御
- 認知・情動ループ
- ドーパミン依存性調節
- 過活動：ジスキネジア・チック・舞踏運動
- 衝動性・強迫傾向
- 低活動：無動・固縮・動作開始困難
- パーキンソニズム

Image Credits

- **BodyParts3D generated by DBCLS, Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.1 JP**
- **BodyParts3D generated by DBCLS, Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.1 JP**
- **BodyParts3D generated by DBCLS, Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.1 JP**
- **Mosconi MW, Wang Z, Schmitt LM, Tsai P, & Sweeney JA, Wikimedia Commons, CC BY 4.0**
- OpenStax College, Wikimedia Commons, CC BY 3.0
- Yeh et al., Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0
- Yeh et al., Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0
- Cerminara NL, Lang EJ, Sillitoe RV, & Apps R, Wikimedia Commons, Free Art License (FAL)
- **Slashme, Patrick J. Lynch & Fvasconcellos, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0**