

第12回全脳アーキテクチャ勉強会

2016.1.14

脳の学習アーキテクチャ



銅谷 賢治

doya@oist.jp

沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット

本日のテーマ

脳と人工知能

小脳、大脳基底核、大脳皮質の回路と学習機構

モジュール自己組織化と組み合わせ問題

脳のビッグデータと大規模計算のもたらすもの

脳と人工知能

電子回路で知能を実現するために
脳のしくみにとらわれる必要はない。

脳のような高度な知能の実現例がある
のだからそれに学ばない手はない。

前世紀の人工知能：専門家の知識をプログラム化
今日の人工知能：ビッグデータからの統計学習

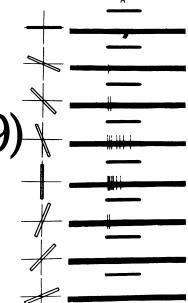
高性能を追い求めた結果、ディープラーニング
のような脳を模した学習の強みが再認識された。

脳科学と人工知能の共進化

脳科学

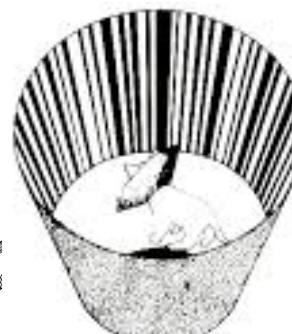
- 特徴抽出細胞

(Hubel & Wiesel 1959)



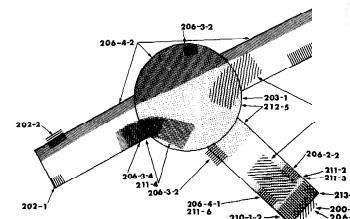
- 経験依存学習

(Blakemore & Cooper 1970)



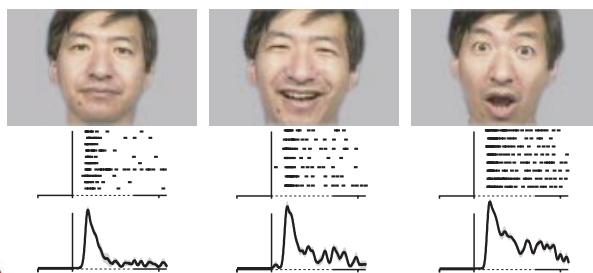
- 場所細胞

(O'Keefe 1976)



- 顔細胞

(Bruce, Desimone, Gross 1981)



(Sugase et al. 1999)



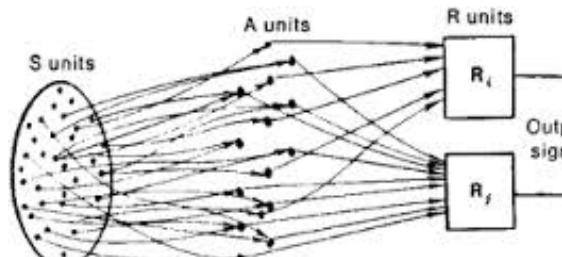
OIST

OKINAWA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY GRADUATE UNIVERSITY

人工知能

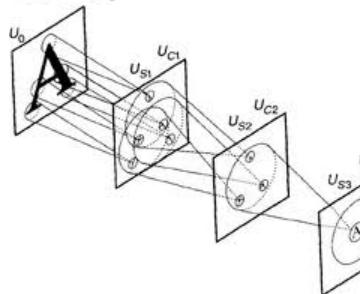
- パーセプトロン

(Rosenblatt 1962)



- 多層教師あり学習

(Amari 1967)

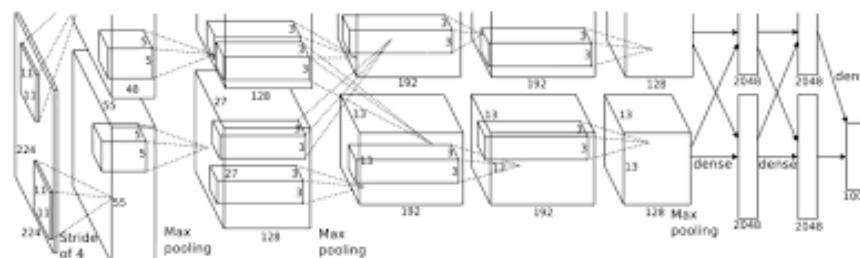


- ネオコグニトロン

(Fukushima 1980)

- ConvNet

(Krizhevsky, Sutskever, Hinton, 2012)



- GoogleBrain

(2012)

脳と人工知能のちがい

自主性：自ら生きるものと作られたもの

情報選択：入力、出力、目標を自分で見つけられるか

能動性：仮説生成と検証による理解か、データ統計か

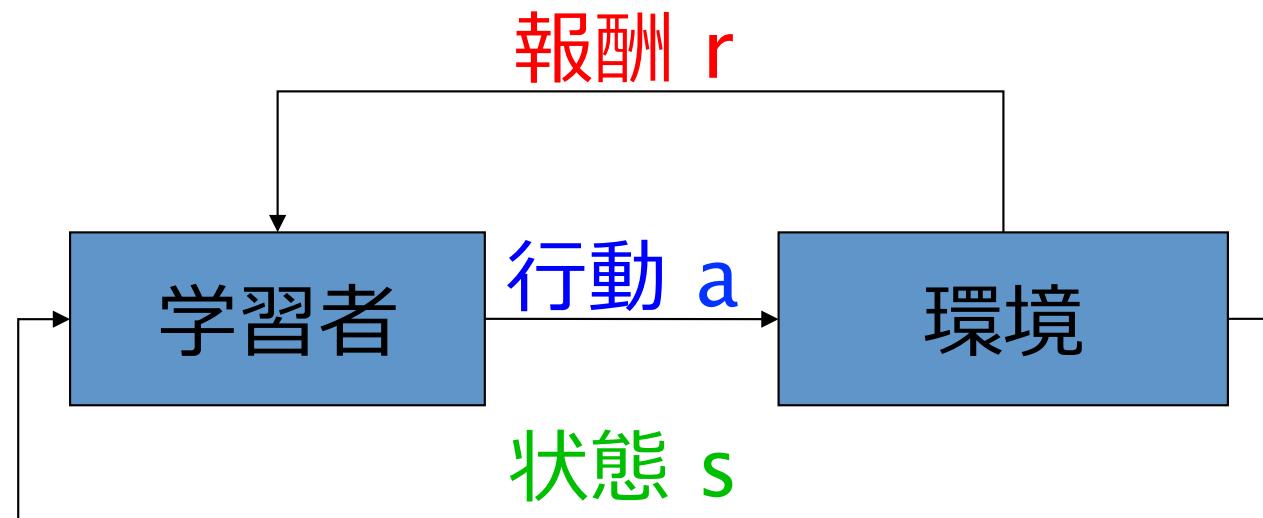
モジュール自己組織化：必要に応じた選択、結合、生成

強化学習

■報酬の予測

■行動の選択

■予測と結果の誤差からの学習

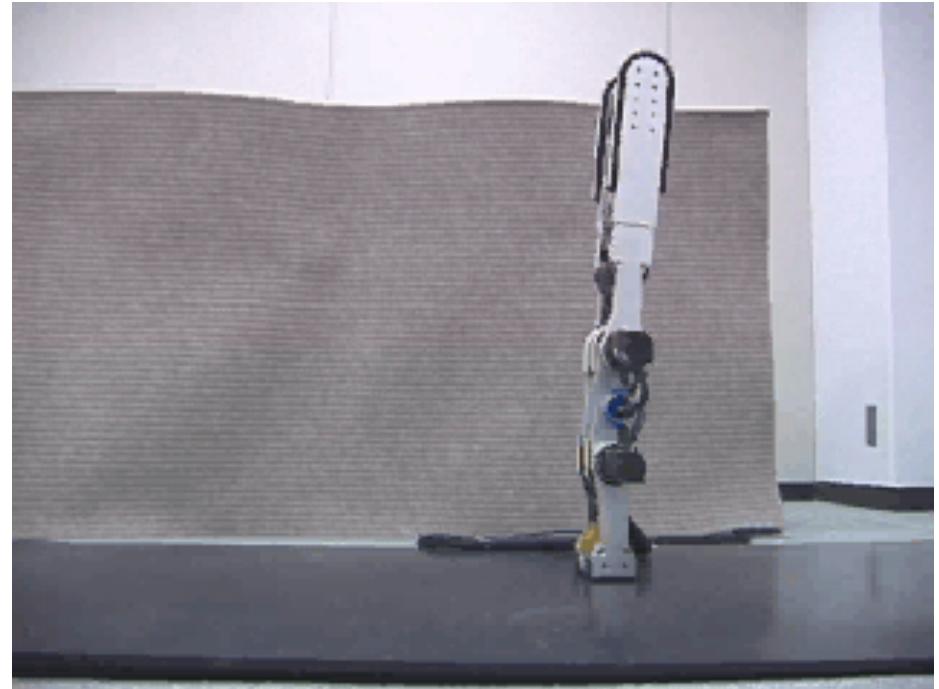


これらをいかに確実に効率よく実現するか？

これらがいかに脳で実現されているか？

起立運動の学習

(Morimoto & Doya, 2000)

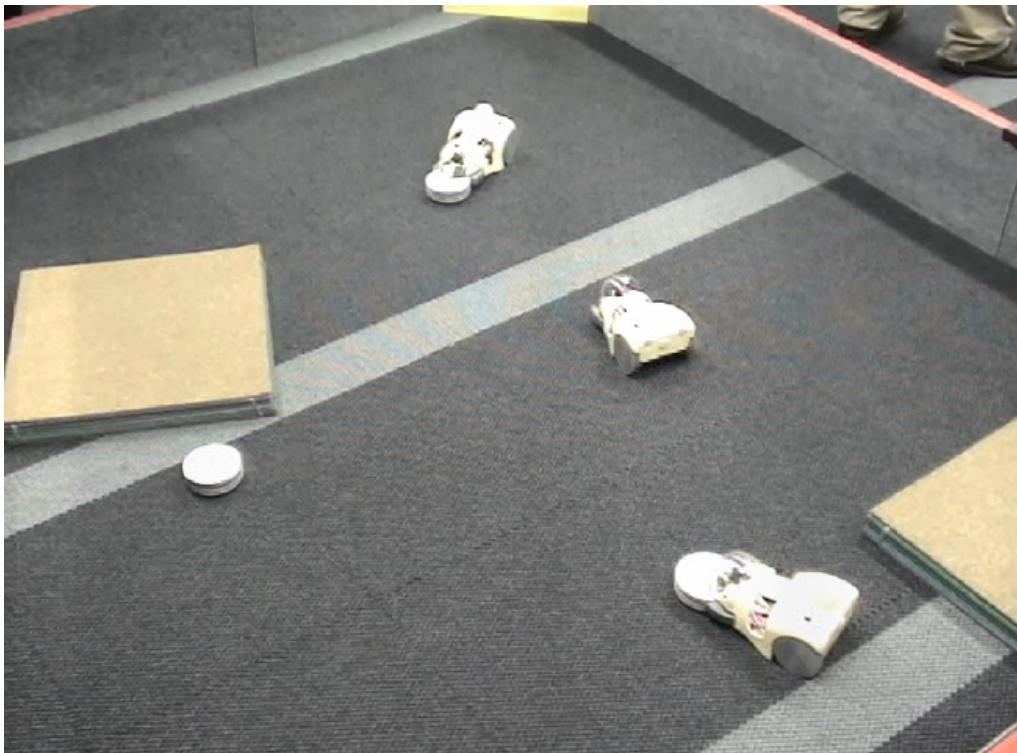


- 報酬：頭の高さ
- 罰 (負の報酬)：転倒

学習し進化するロボット集団

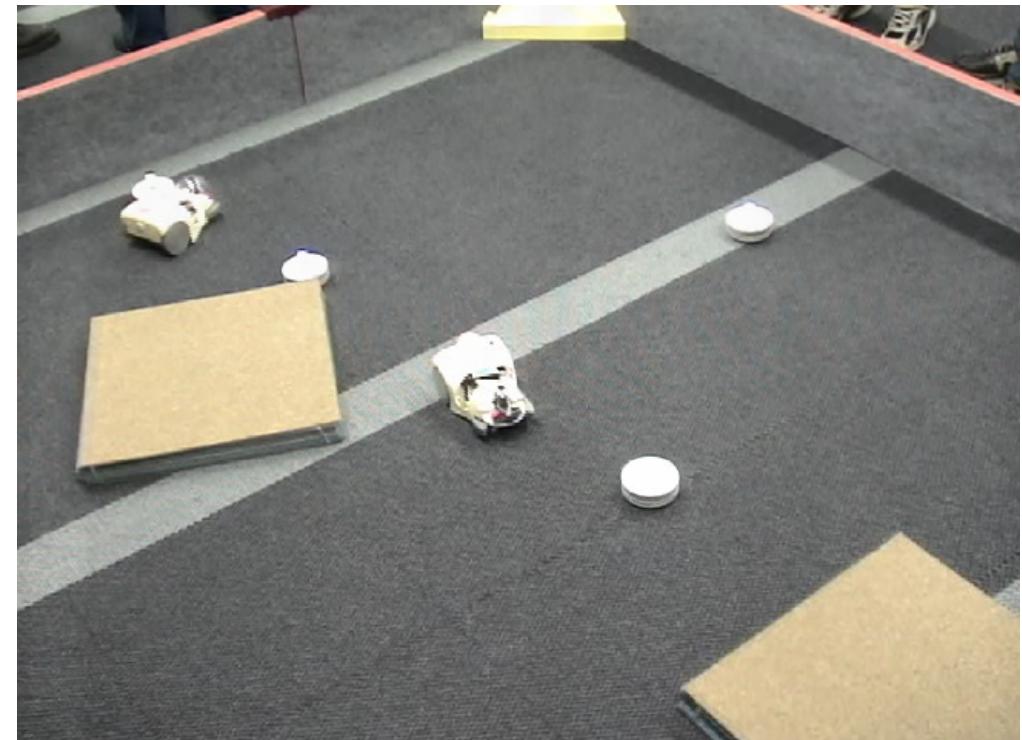
■生存

- バッテリー捕獲



■複製

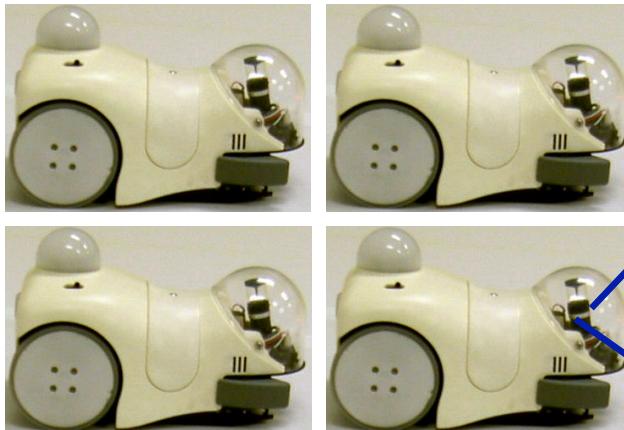
- “遺伝子”的コピー



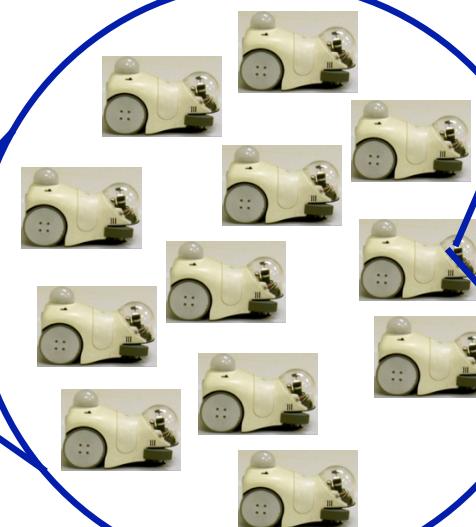
ロボットの学習のしかたの進化

Population

Robots



Virtual agents 15-25



Genes

Weights for top layer NN

$$w_1, w_2, \dots, w_n$$

Weights shaping rewards

$$v_1, v_2, \dots, v_n$$

Meta-parameters

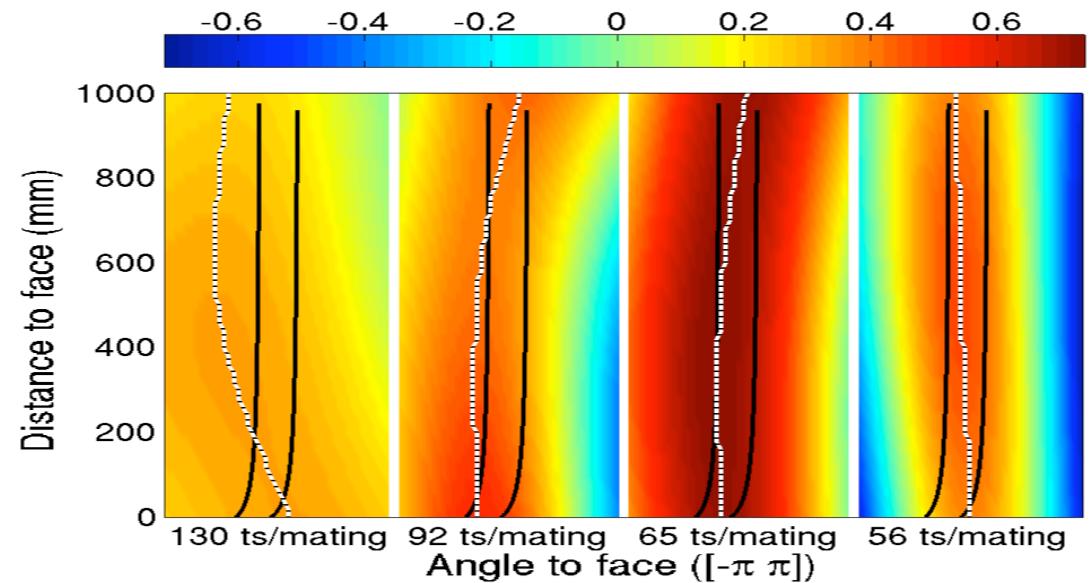
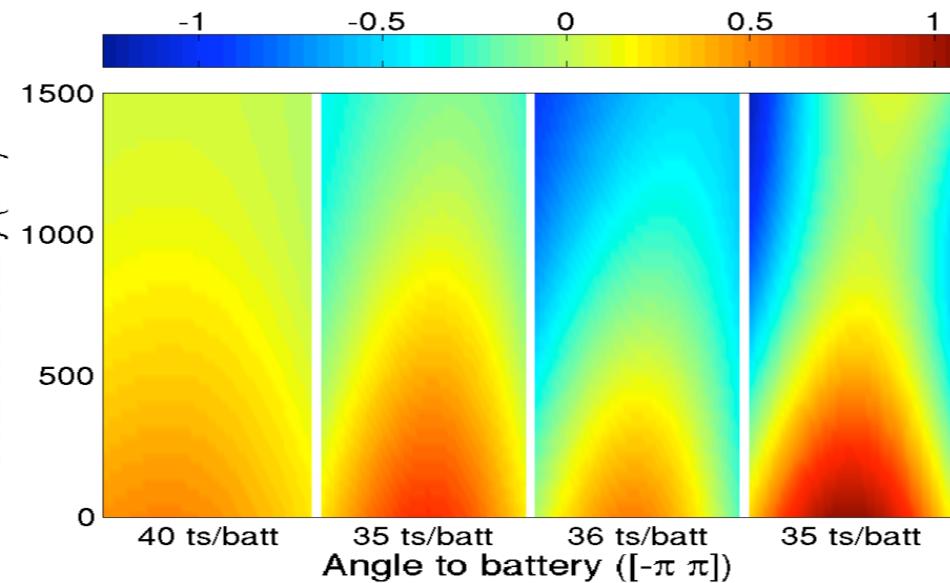
$$\alpha\gamma\lambda\tau_k\tau_0$$

- 一生(約5分)の間に交配して遺伝子を残す
 - 交配の成功は、充電レベルに比例

進化により獲得された視覚報酬

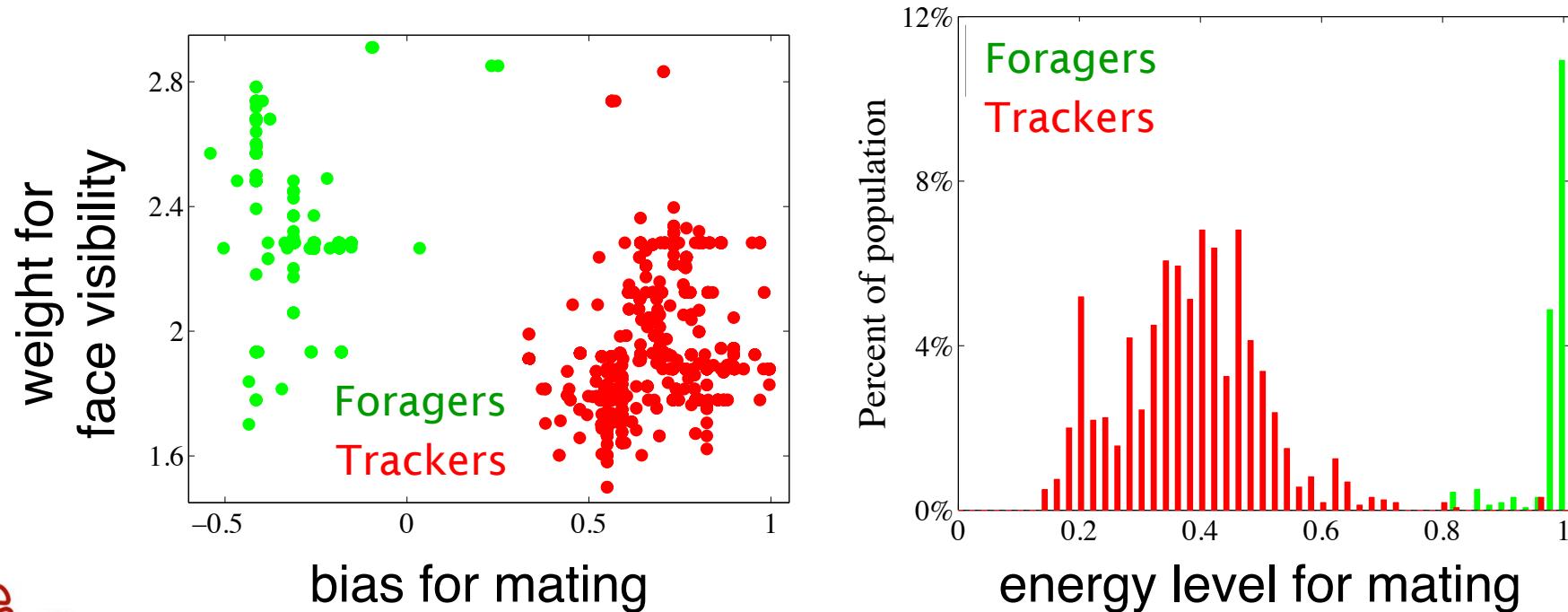
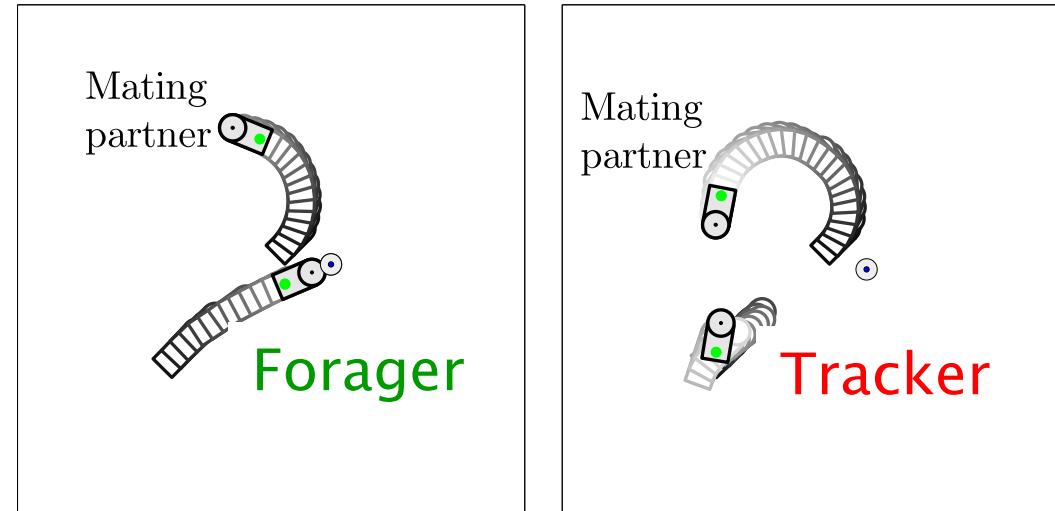
■ バッテリー

■ 他のロボットの顔



行動戦略の多型性

Foragers and Trackers



強化学習

■ 報酬の予測: 価値関数

- $V(s) = E[r(t) + \gamma r(t+1) + \gamma^2 r(t+2) \dots | s(t)=s]$
- $Q(s,a) = E[r(t) + \gamma r(t+1) + \gamma^2 r(t+2) \dots | s(t)=s, a(t)=a]$

■ 行動の選択 これらのステップを実現する回路機構は?

- *greedy*: $a = \operatorname{argmax} Q(s,a)$
- *Boltzmann*: $P(a|s) \propto \exp[-\beta Q(s,a)]$

■ 予測の修正: TD 誤差

- $\delta(t) = \underline{r(t) + \gamma V(s(t+1))} - V(s(t))$
- $\Delta V(s(t)) = \alpha \delta(t)$
- $\Delta Q(s(t),a(t)) = \alpha \delta(t)$

これらのパラメタの制御機構は?

ドーパミン細胞は報酬予測誤差を表わす

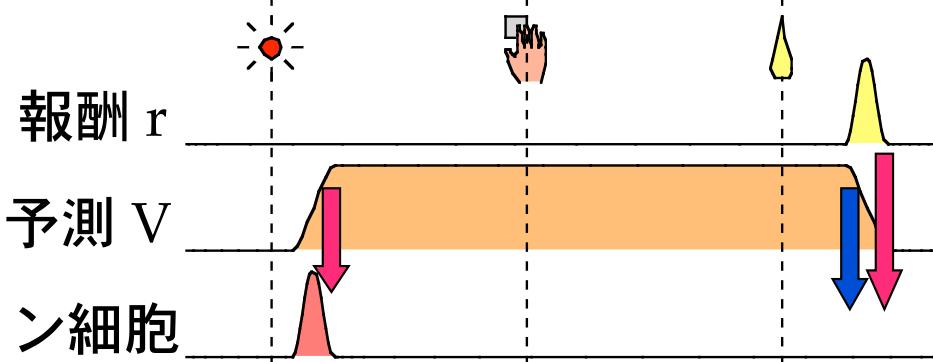
$$\delta(t) = r(t) + \gamma V(s(t+1)) - V(s(t))$$

(a) 学習前

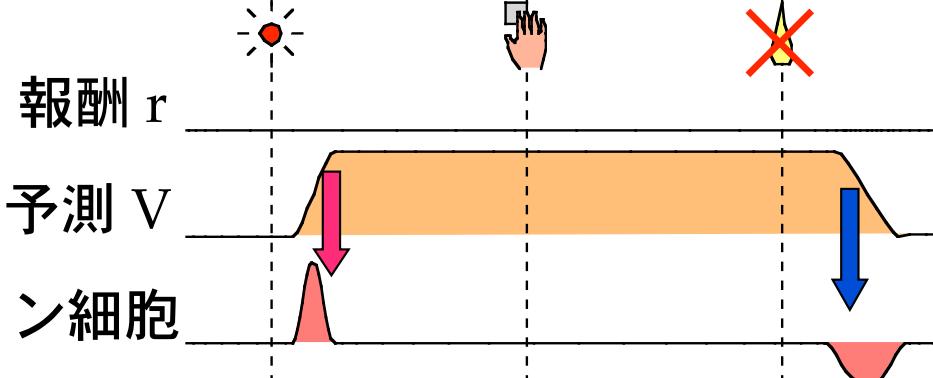


(Schultz et al. 1997)

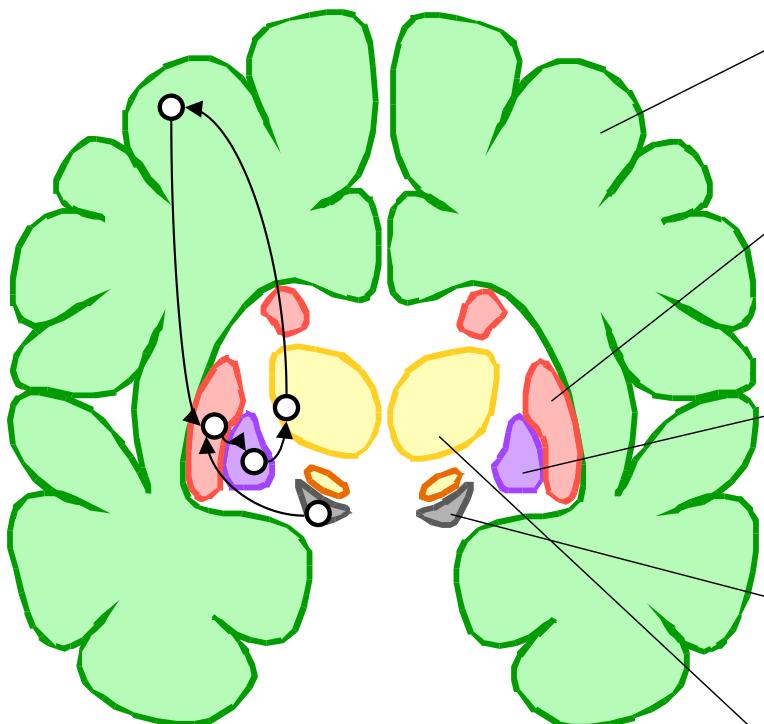
(b) 学習後



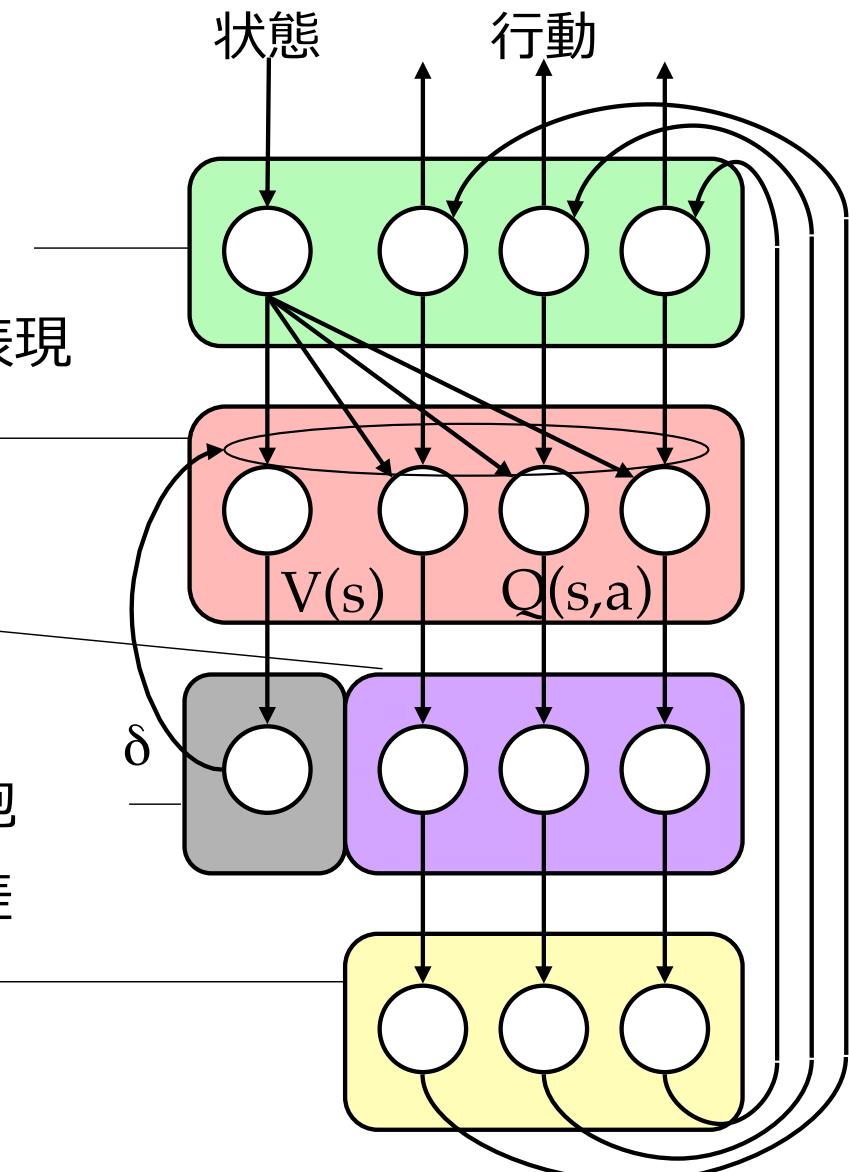
(c) 報酬なし



大脳基底核の強化学習モデル (Doya 2007)



大脳皮質
状態・行動表現
線条体
報酬予測
淡蒼球
行動選択
ドーパミン細胞
報酬予測誤差
視床

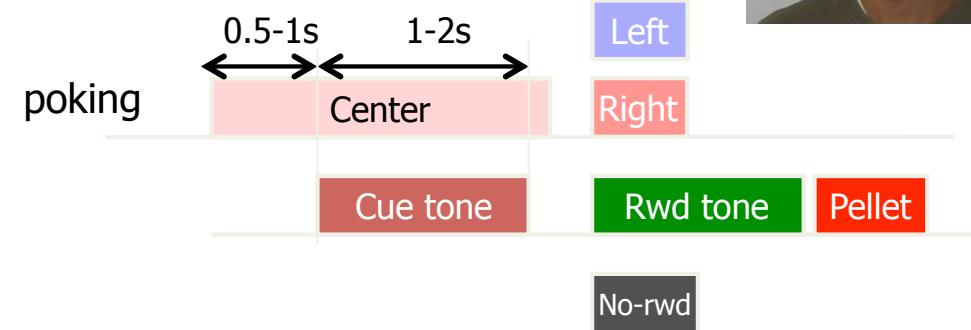


ラットのギャンブル課題

(Ito & Doya, 2015 JNS)

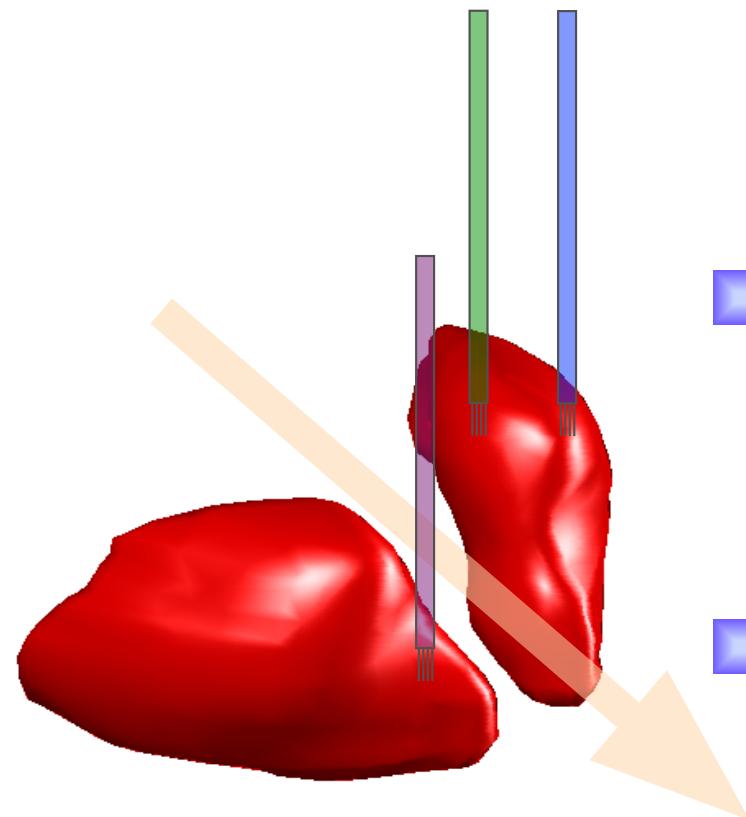


Left Center Right



| Cue tone | 報酬確率 (L, R) |
|-----------------------------------|---|
| Left tone (900Hz) | 固定 (50%, 0%) |
| Right tone (6500Hz) | 固定 (0%, 50%) |
| Free-choice tone (White noise) | ブロックで変化 (90%, 50%) (50%, 90%) (50%, 10%) (10%, 50%) |

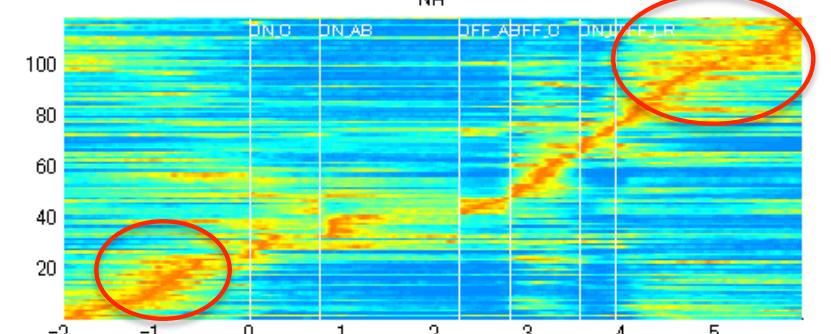
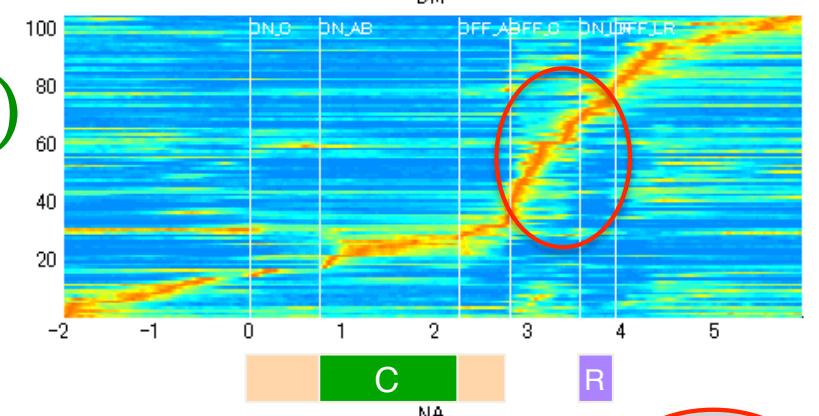
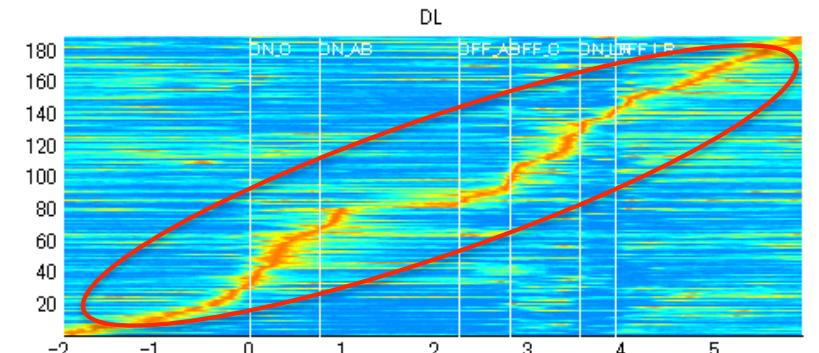
線条体の神経活動記録



■ 背外側 (DLS)

■ 背内側 (DMS)

■ 腹側 (VS)



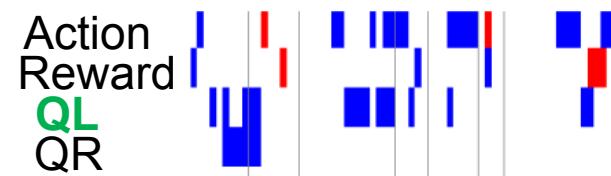
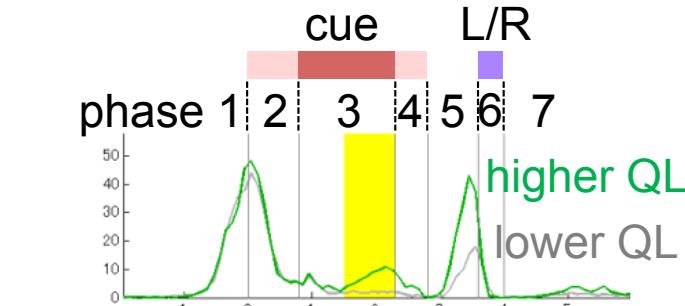
線条体の行動価値/状態価値ニューロン

(Ito & Doya, 2015)

■ 行動価値 Q

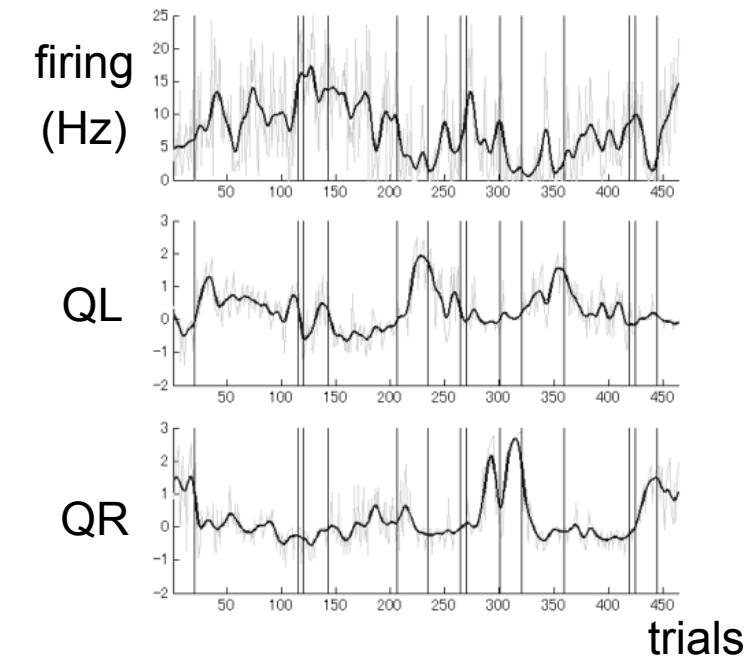
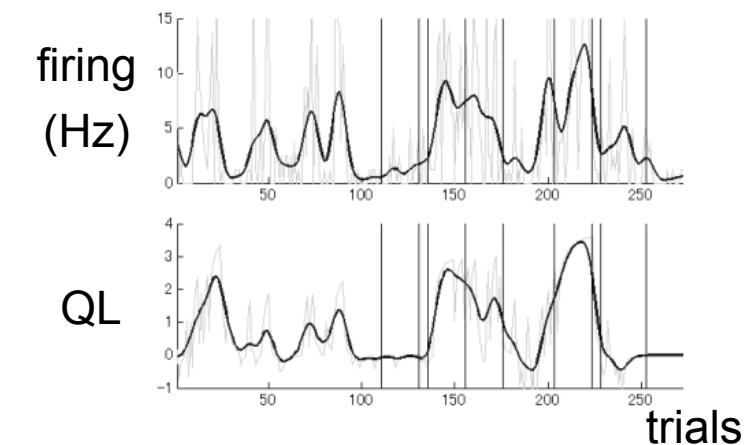
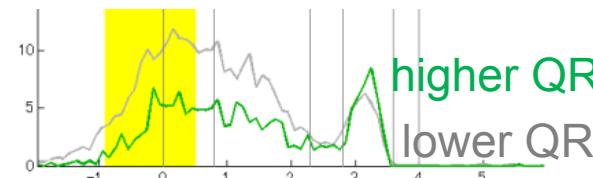
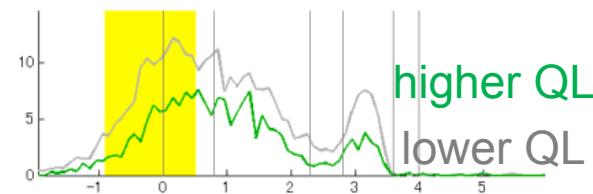
● 背外側

● 背内側



■ 状態価値 V

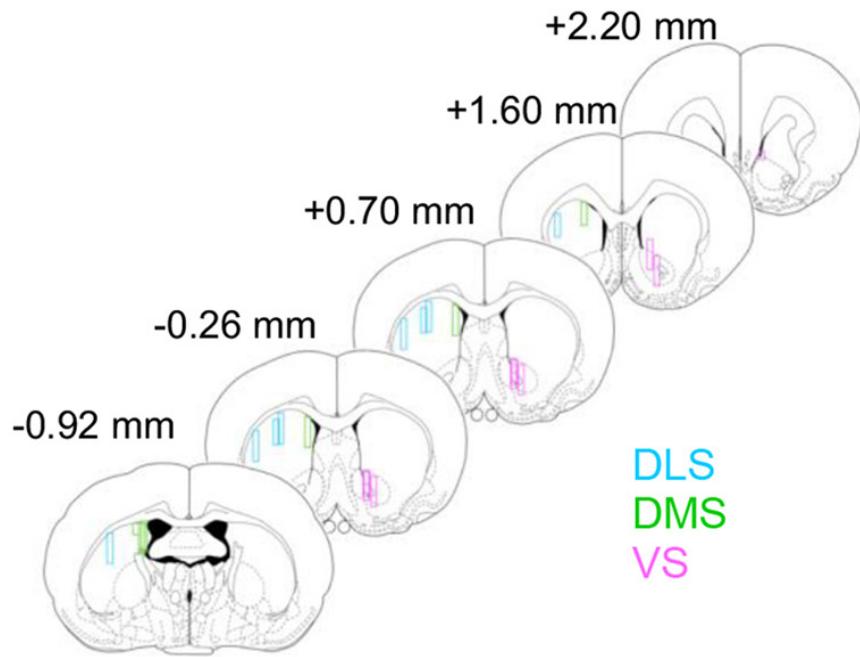
● 腹側



OIST

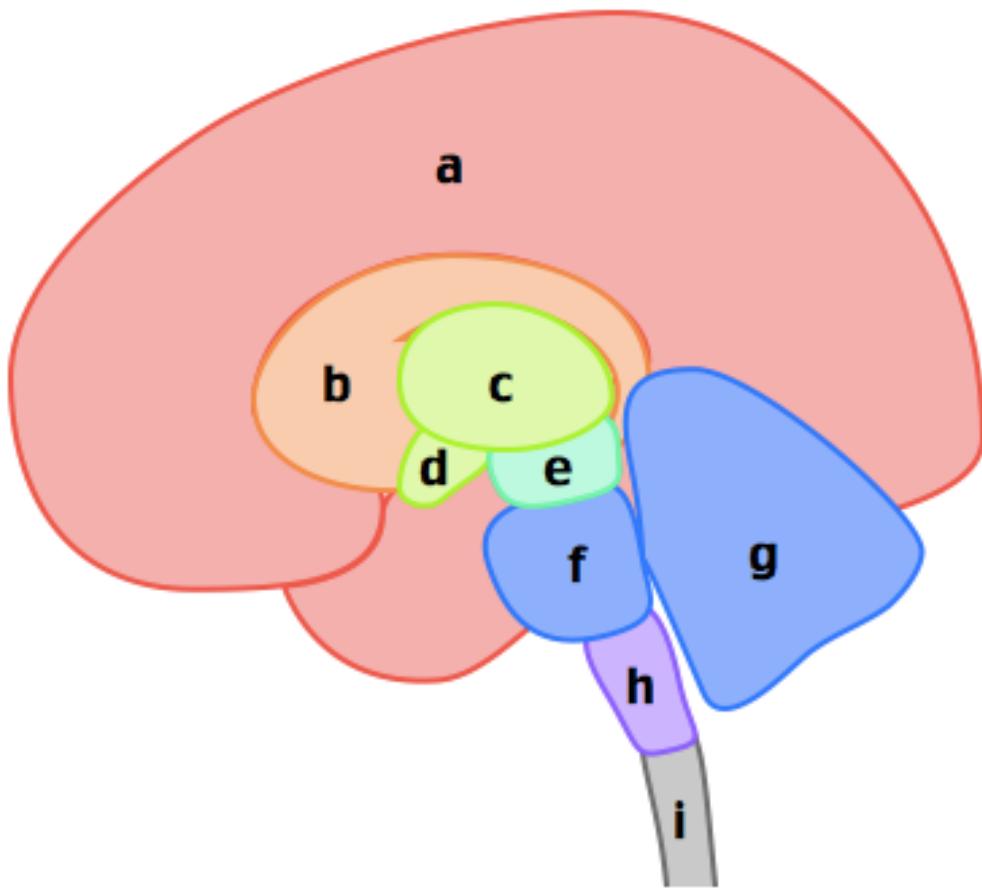
OKINAWA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY GRADUATE UNIVERSITY

皮質-線条体回路の階層構造



- 背外側線条体 (DLS) – 運動野
 - 多様なフェーズで活動
 - 具体的な運動制御
- 背内側線条体 (DMS) – 前頭前野
 - 左右の選択時に活動
 - タスクレベルの行動価値
- 腹側線条体 (VS) – 情動系
 - 試行前後の状態価値
 - やる価値があるか?

脊椎動物の神経系



前脳 forebrain

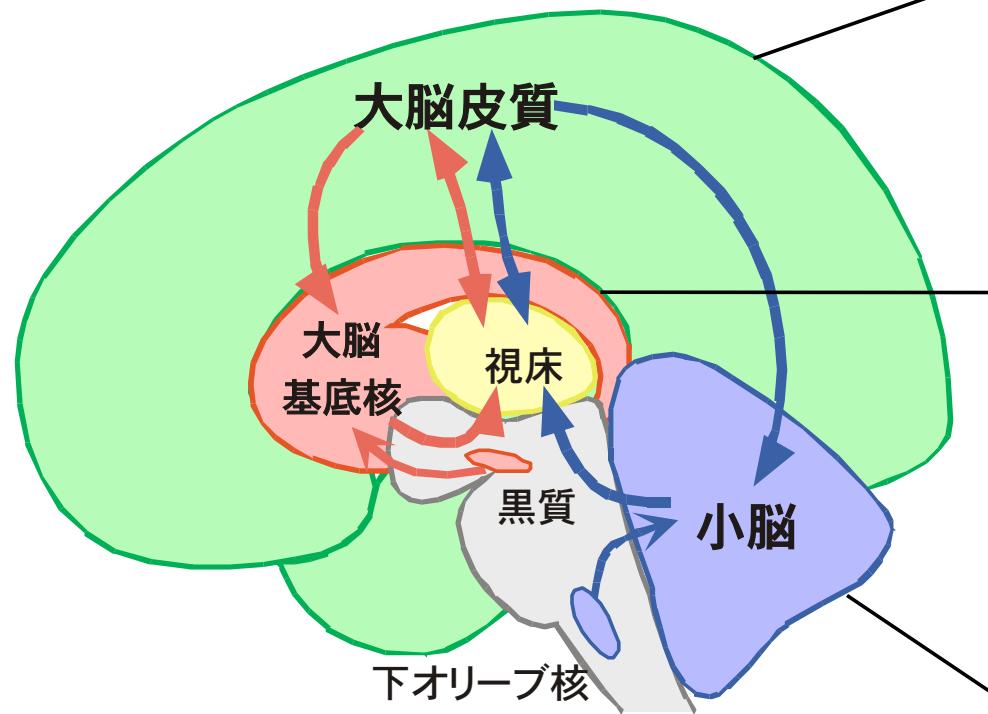
- 大脳皮質 cerebral cortex (a)
 - 新皮質 neocortex
 - 古皮質 paleocortex: 嗅脳
 - 原皮質 archicortex: 前脳基底部, 海馬
- 大脳核 basal nuclei (b)
 - 新線条体 neostriatum: 尾状核, 被殼
 - 古線条体 paleostriatum: 淡蒼球
 - 原線条体 archistriatum: 扁桃体
- 間脳 diencephalon
 - 視床 thalamus (c)
 - 視床下部 hypothalamus (d)

脳幹 brain stem と小脳

- 中脳 midbrain (e)
- 後脳 hindbrain
 - 橋 pons (f)
 - 小脳 cerebellum (g)
- 延髄 medulla (h)
- 脊髄 spinal cord (i)

学習アルゴリズムによる分化

(Doya, 1999)



大脳皮質:教師なし学習:状態表現

入力 → [] → 出力

大脳基底核:強化学習:報酬予測

入力 → [] → 出力
報酬信号

小脳:教師あり学習:内部モデル
目標出力

入力 → [] → 出力
誤差信号

モデルフリー／モデルベースの意思決定

モデルフリー

- 「行動の価値」を記憶
- 直感的・反射的行動選択
- やってみた経験から学ぶ

処理は単純／反復経験が必要

モデルベース

- 行動の結果を予測する内部モデル
- 先読みによる行動選択
 - 「脳内シミュレーション」
- やってみる前に考える

柔軟な適応／処理は複雑

モデルフリー／モデルベースの行動選択

■ モデルフリー

- $a = \operatorname{argmax}_a Q(s, a)$

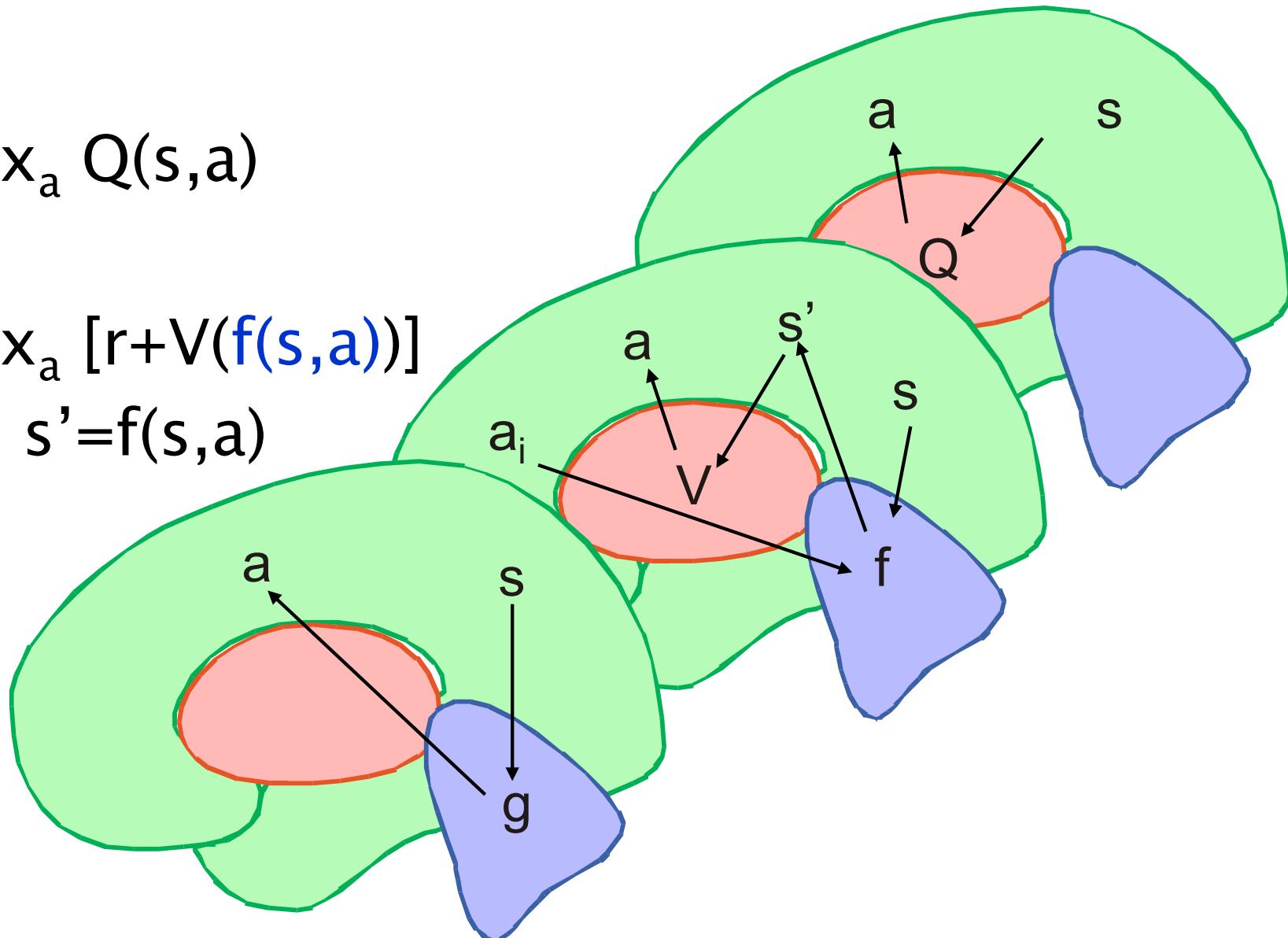
■ モデルベース

- $a = \operatorname{argmax}_a [r + V(f(s, a))]$

順モデル: $s' = f(s, a)$

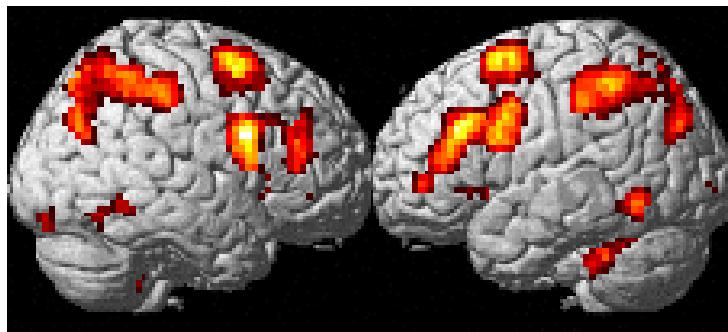
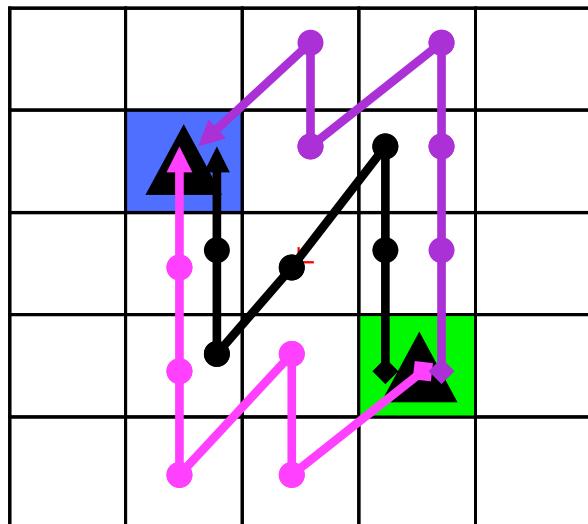
■ 定型的行動

- $a = g(s)$

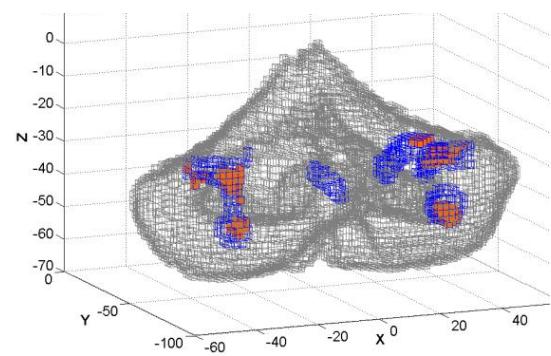
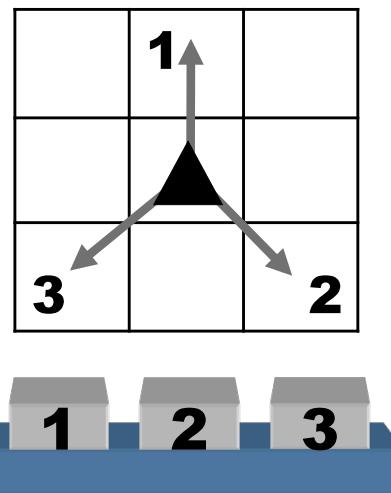


行動-状態系列を探索中の脳活動

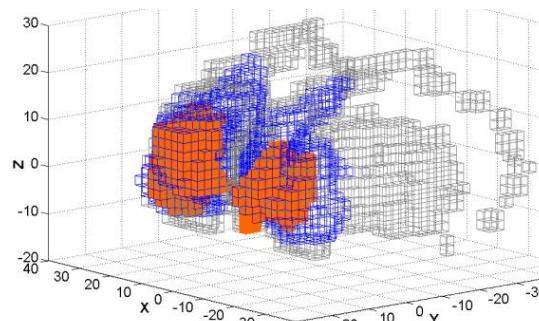
Alan Fermin



- 大脳皮質
 - 脳内表象の保持



- 小脳
 - 行動結果の予測



- 大脳基底核
 - 状態の評価

予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用

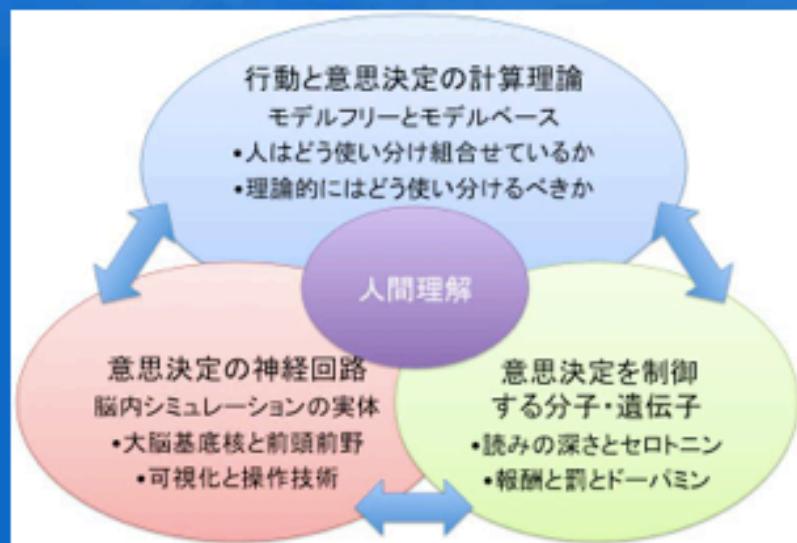
Elucidation of the Neural Computation for Prediction and Decision Making

[ホーム](#)[領域代表あいさつ](#)[領域概要](#)[研究組織・メンバー](#)[公募研究](#)[会議・シンポジウム案内](#)[活動報告・ニュースレター](#)[研究成果](#)[お問い合わせ](#)[リンク](#)[Members' Site](#)

研究について About

本領域の目的は、人の意思決定の原理と脳機構を、論理学や統計推論の理論、人の行動解析と脳活動計測、実験動物での神経活動の計測と操作、計算機シミュレーションとロボットによる再構成を通じて解明し、人の心、意識、意欲とは何かという根源的な問題に迫るとともに、意思決定の障害をともなう精神疾患の解明と処方の導出、さらに人の行動決定の特性に

ねざした親しみやすいソフトウェアやロボットの開発をうながすことです。意思決定においては、仮想的な行動の結果を予測する「脳内シミュレーション」が重要な役割を果たすため、本領域の研究では、特に脳内シミュレーションを可能にする神経回路のダイナミクスと学習機構の解明を重点的なテーマとし、行動下での局所回路の神経細胞活動の網羅的光学記録、細胞種を特定した光刺激や機能抑制など、最新の実験技術を駆使してブレークスルーをめざします。

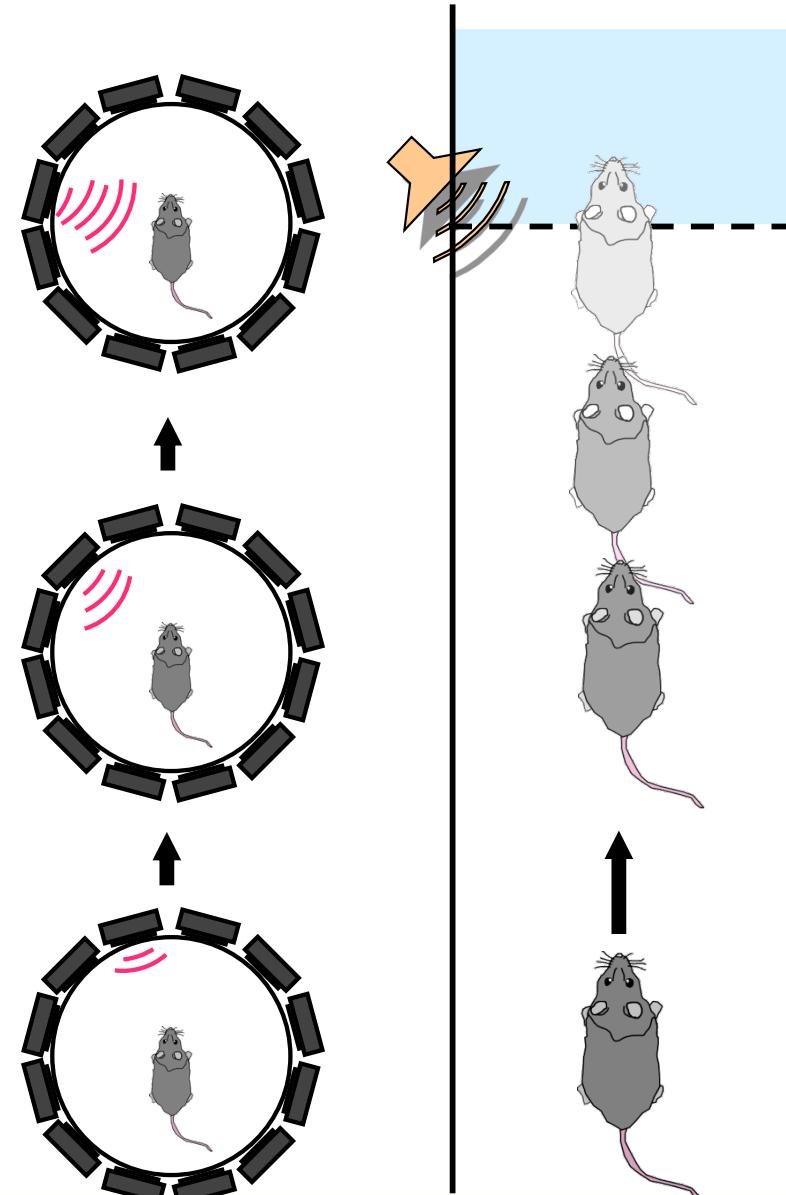
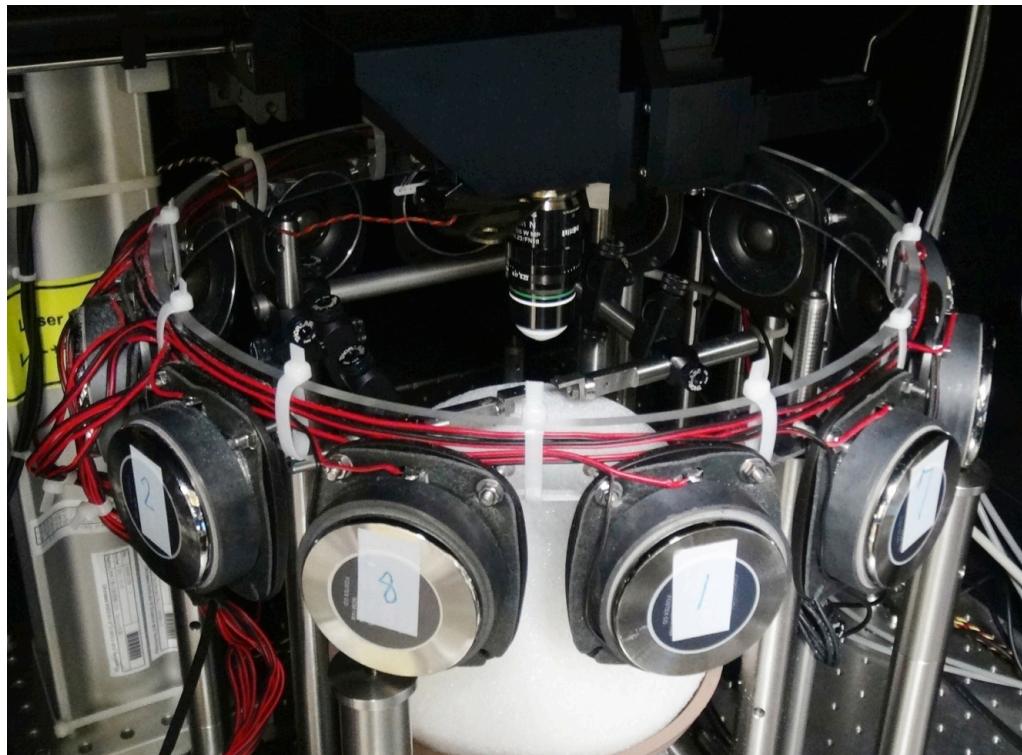


二光子顕微鏡下での行動課題

Akihiro Funamizu

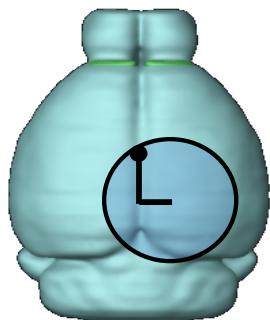


- トラックボールの動きに応じて仮想音源が移動

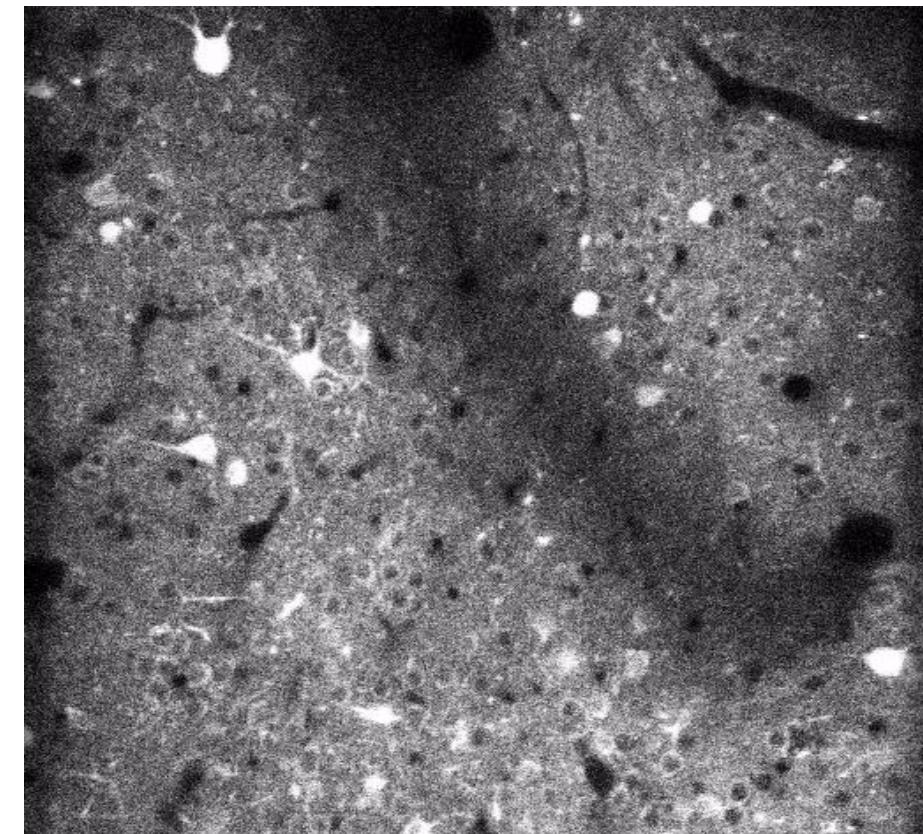
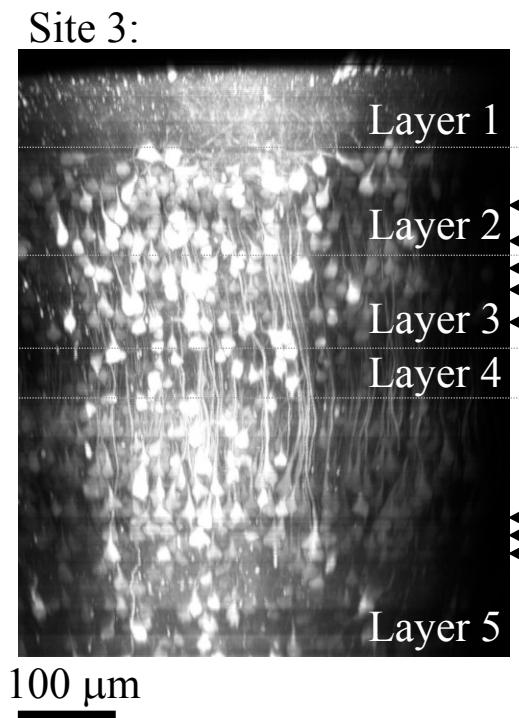
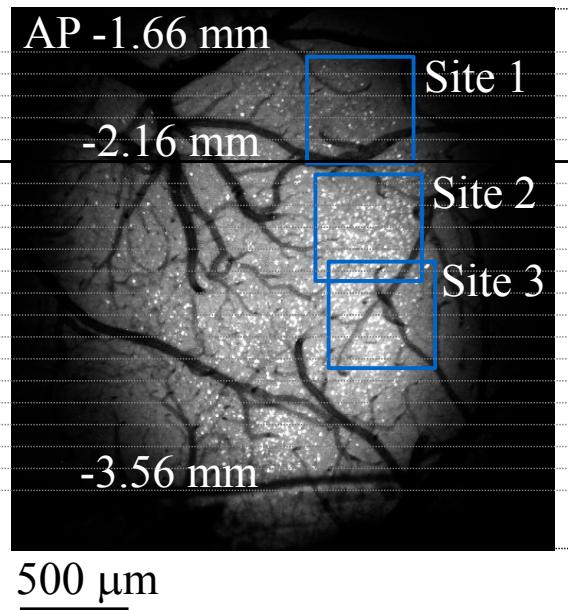


二光子顕微鏡による神経活動記録

■ AAウイルスによるカルシウム感受性蛍光タンパク発現



- posterior parietal cortex (PPC)
- posterior medial area (PM)



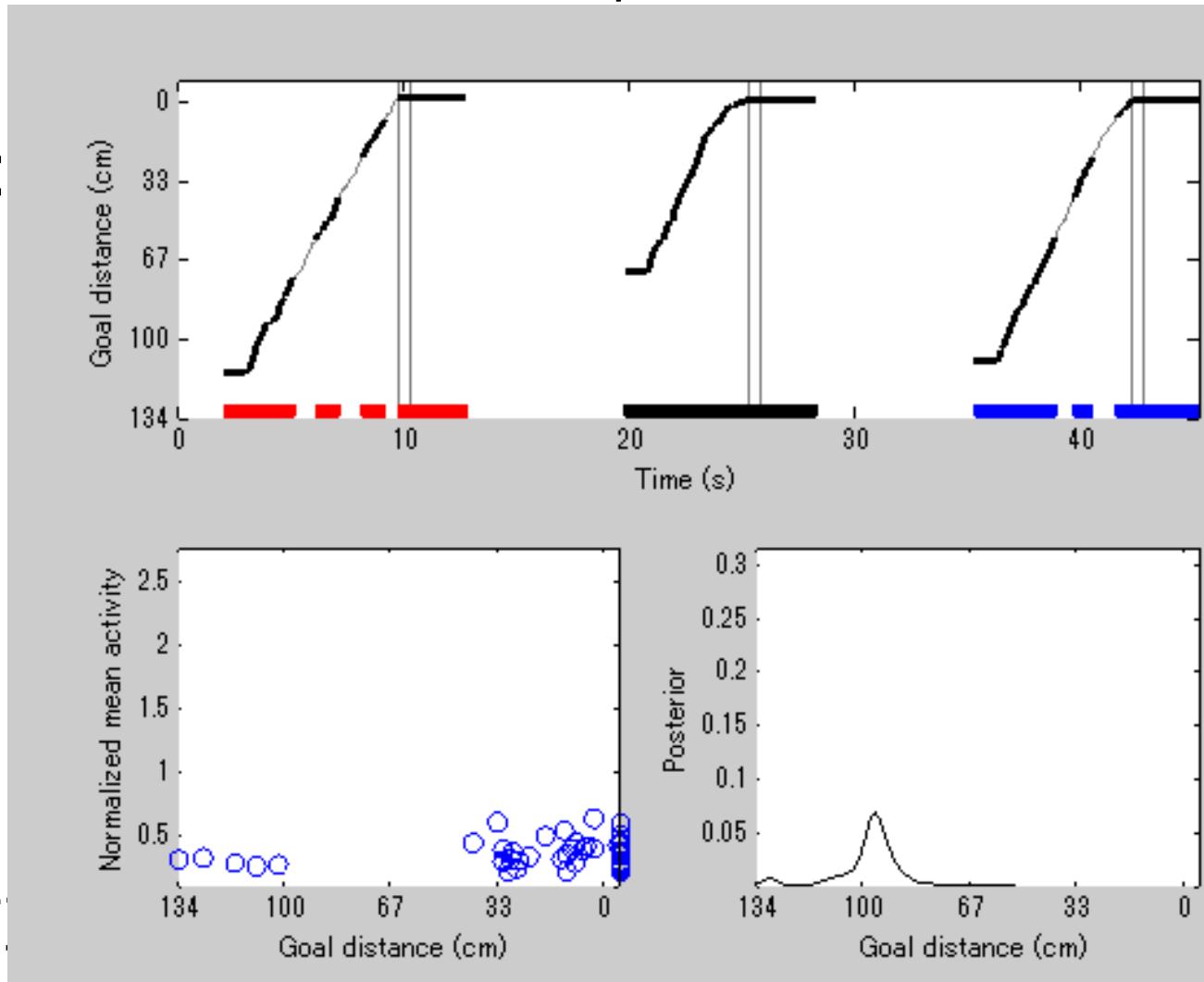
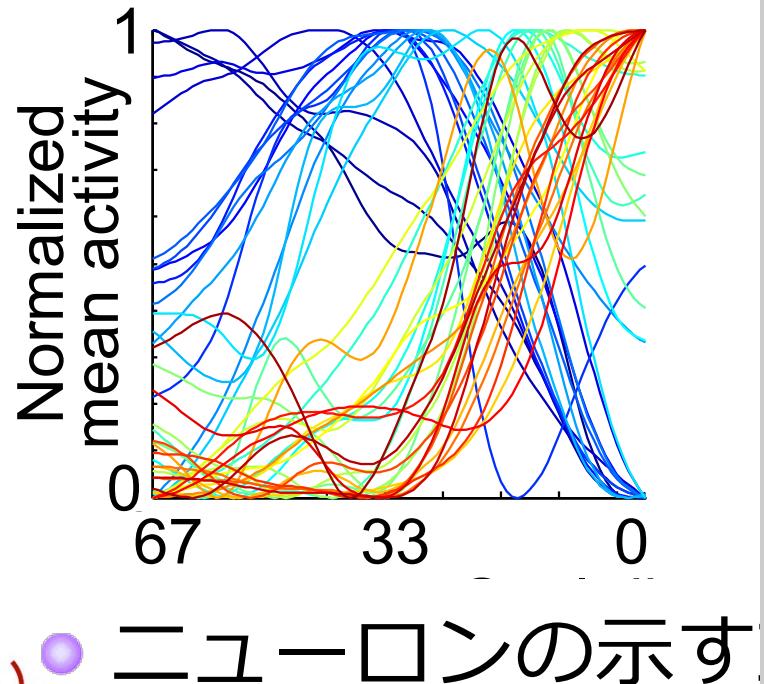
ゴール距離のデコーディング

■ 各ニューロンのゴール距離 x での活動 f_i

- 応答関数 $p(f_i|x)$

■ 距離 x のベイズ推定:

PPC: $N = 43$



革新脳プロジェクト (2014~2023)

- マーモセットの脳構造・機能マップの構築
 - 理研と 22 のラボ
 - OIST: モデル化技術



Brain Mapping by Integrated
Neurotechnologies for Disease Studies

TOP

Overview

Central Institutes

Clinical Research Group

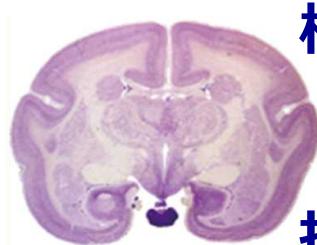
Technology Development Group



Studying the neural networks controlling higher brain functions in the marmoset, to gain new insights into information processing and diseases of the human brain

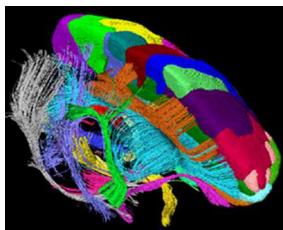
マルチスケール脳モデル構築

脳構造マップ

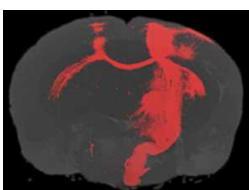


構造MRI

拡散MRI



組織染色



トレーサー



透明化脳の分子
イメージング

連続切片EM

神経回路モデル

マクロスコピック

全脳約100の領野間の結合
ポピュレーション発火頻度
全脳の認知行動機能を再現

メゾスコピック

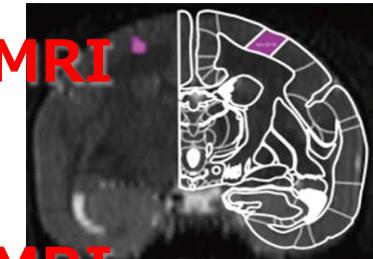
各領野内の細胞種・細胞数・
結合パターン・可塑性
スパイクニューロンモデル
各領野の計算機構を解明

ミクロスコピック

細胞形態、チャネルとレセプタのダイナミクス
細胞内分子シグナリング
細胞レベルの制御機構を解明

脳機能マップ

タスクfMRI

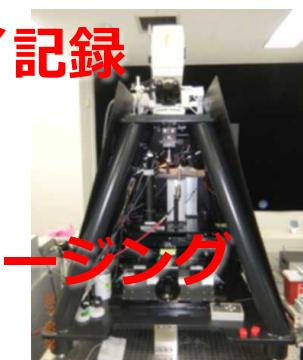


安静時fMRI

ECoG



電極アレイ記録



Ca2+イメージング

細胞内分子
イメージング

「京」による世界最大規模の 大脳皮質回路シミュレーション (2013.8)

■ 17.3億個の積分発火ニューロンモデル

- 10.4兆個のシナプス
- シナプス可塑性 (STDP)
- 汎用シミュレータ (NEST)

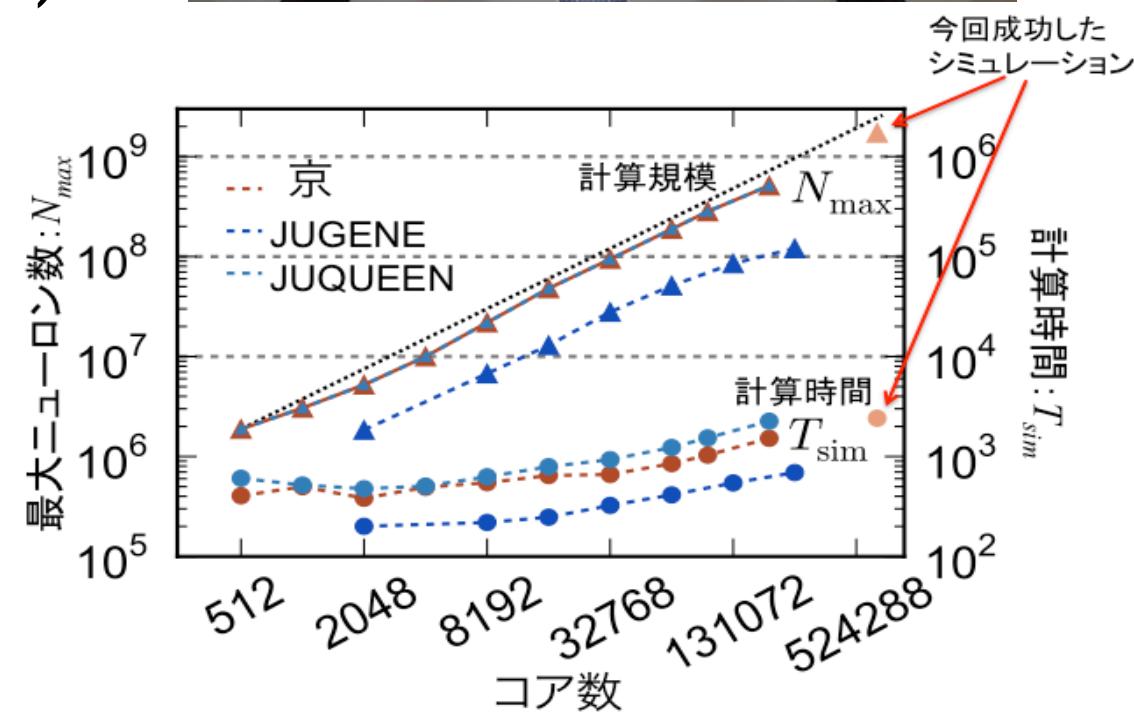


■ 細胞数

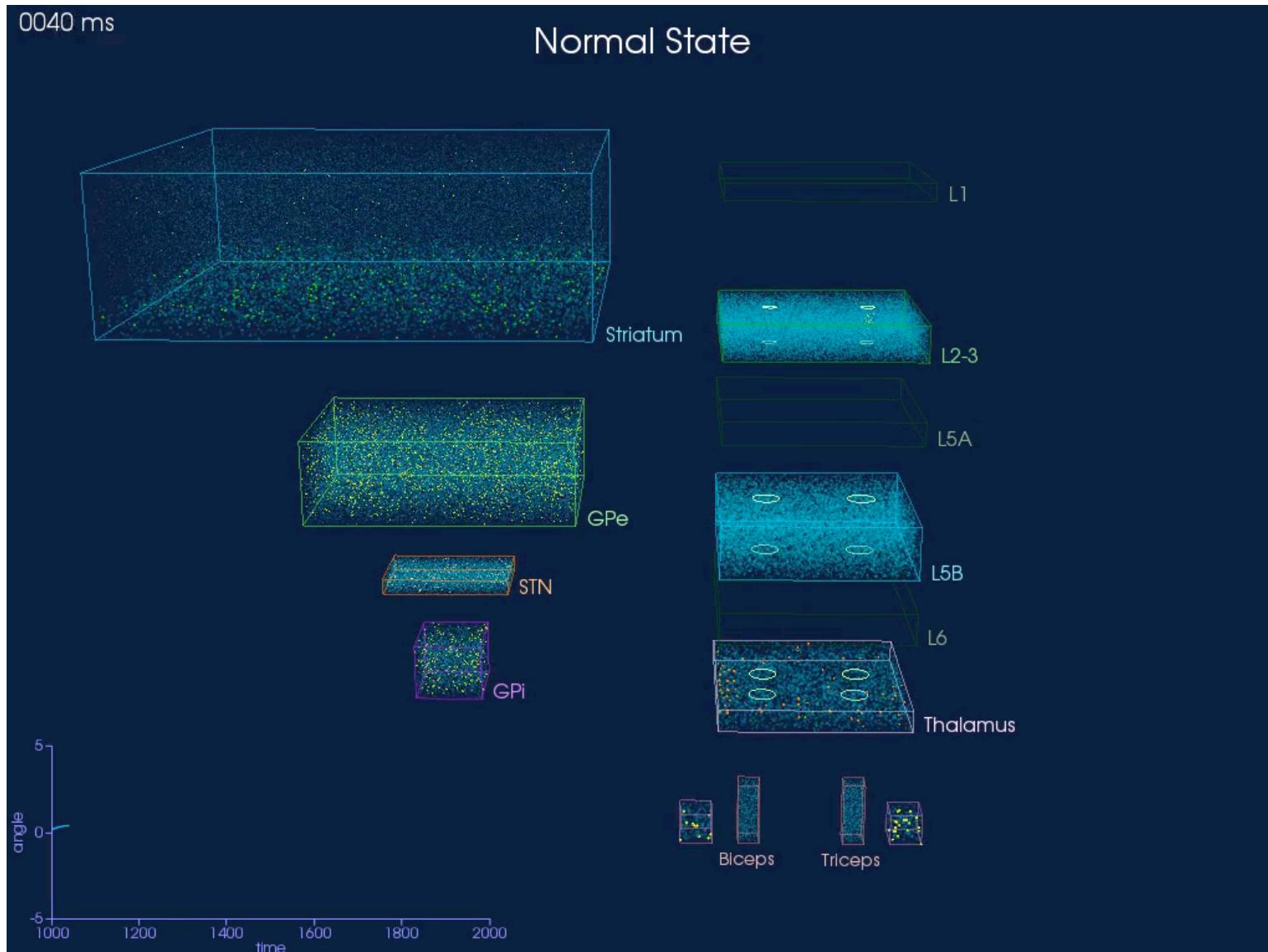
- マーモセット：6億
- マカク：80億
- ヒト：860億

■ 1秒の再現に40分

- 結合はランダム



大脳基底核－視床－大脳皮質モデル





会見・報道・お知らせ

政策・審議会

白書・統計・出版物

申請・手続き

文部科学省の紹介

教育

科学技術・学術

スポーツ

文化

トップ > 政策・審議会 > 審議会情報 > 調査研究協力者会議等（研究振興） > ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会 > ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会報告書

● ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会報告書

平成26年8月20日

ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会

□ [ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題についての検討委員会報告書 \(PDF:1,582KB\)](#)

⑬ 思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用

革新技術による脳科学の大量のデータを融合した大規模多階層モデルを構築し、ポスト「京」での大規模シミュレーションにより思考を実現する脳の大規模神経回路を再現し、人工知能への応用をはかる。

脳と現在の人工知能のちがい

自主性：自ら生きるものと作られたもの

- Cyber Rodent

情報選択：入力、出力を自ら見つけるか、与えられるか

- LASSO, Deep learning

能動性：仮説生成と検証による理解か、データ統計か

- Deep generative network

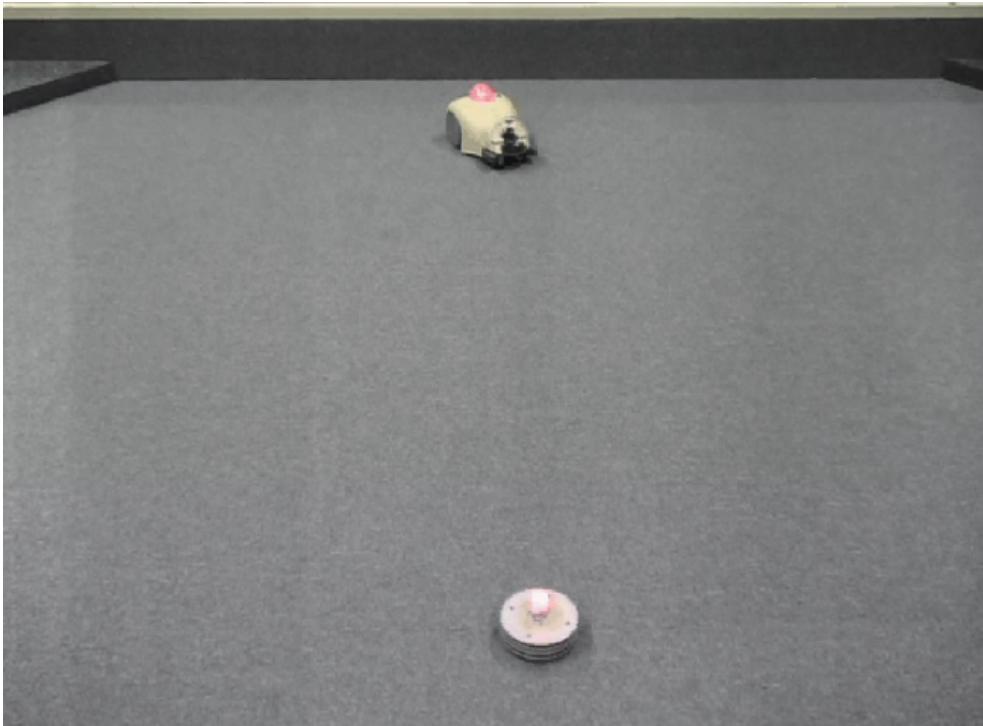
モジュール自己組織化：必要に応じた選択、結合、生成

- Probabilistic programming

将来報酬の割引率 γ

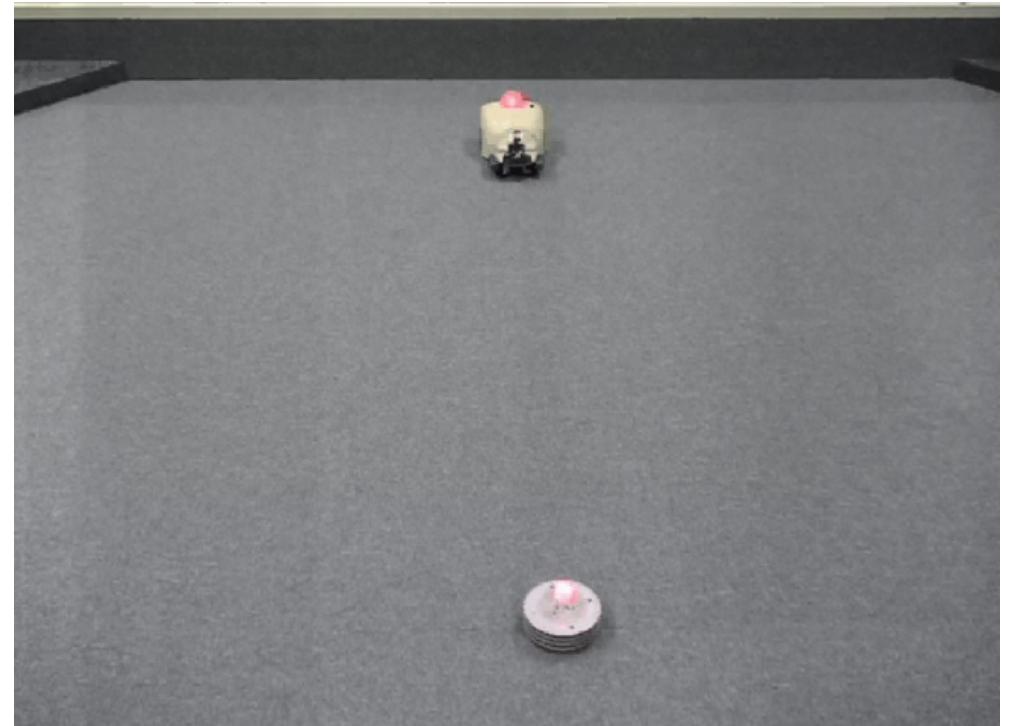
■ 大きな γ

- 遠くの電池も取りに行く



■ 小さな γ

- 近くの電池しか取らない



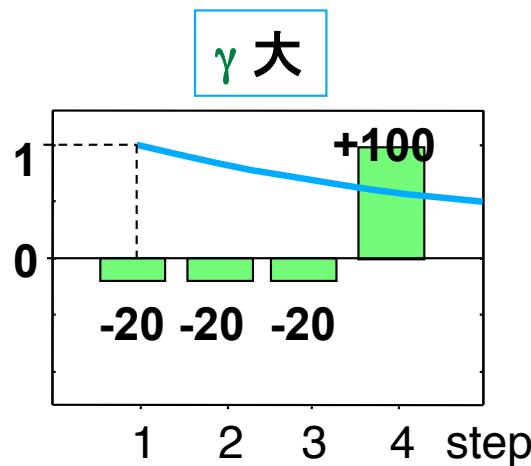
報酬予測の時間スケール

$$V(t) = E[r(t) + \gamma r(t+1) + \gamma^2 r(t+2) + \dots]$$

割引係数 γ : どれぐらい先の報酬まで予測するか

苦労してもやる！

$$V = 18.7$$



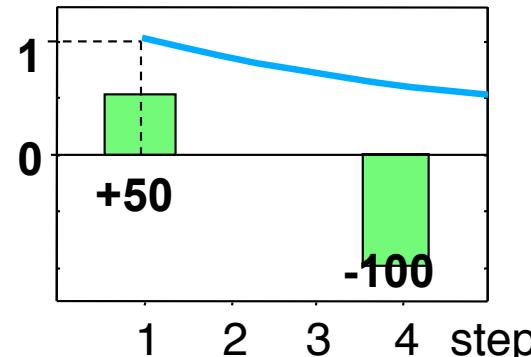
うつ病？

やらないほうがまし

$$V = -25.1$$

危ないことはやらない

$$V = -22.9$$



衝動性？

ついやってしまう

$$V = 47.3$$

セロトニン？



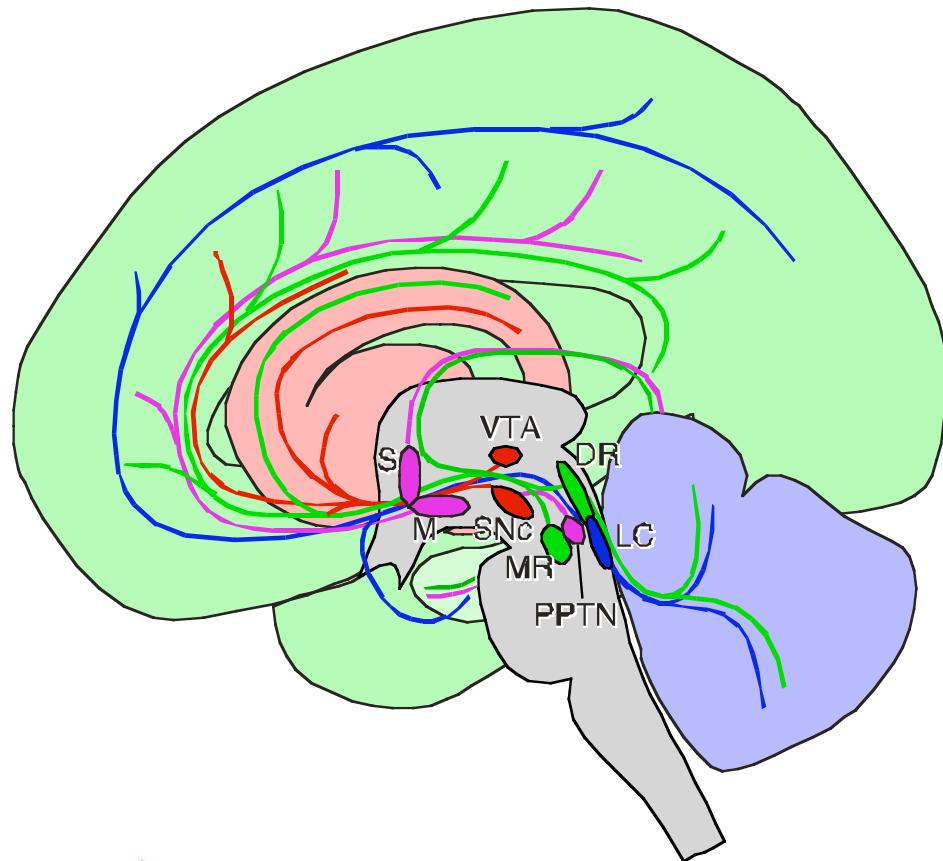
OIST

OKINAWA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY GRADUATE UNIVERSITY

神経修飾物質系とメタ学習

(Doya, 2002)

- 脳幹から小脳、基底核、大脳皮質に広範に投射
 - 学習の大域変数／パラメタを制御？



ドーパミン: 報酬予測誤差 δ
アセチルコリン: 学習速度 α
ノルアドレナリン: 探索の絞り β
セロトニン: 予測の時間スケール γ

謝辞

■ 強化学習ロボット

- 内部英治
- Stefan Elfwing
- 森本淳 (ATR)

■ 行動価値／線条体

- 伊藤真
- 鮫島和行 (玉川大)
- 木村實 (玉川大)
- 上田康雅 (京都府立医大)

■ 脳内シミュレーション

- 船水章大
- Bernd Kuhn
- Alan Fermin (玉川大)
- 吉田岳彦
- 吉本潤一郎

■ セロトニン

- 宮崎勝彦
- 宮崎佳代子
- 濱田太陽
- 田中謙二 (慶應大)
- 山中章宏 (名古屋大)

■ fMRI

- 清水優
- 徳田智磯
- 山脇成人 (広島大)
- 田中沙織 (ATR)
- Nicolas Schweighofer (USC)
- 川人光男 (ATR)

**新学術領域研究「予測と意思決定」
脳科学研究戦略推進プログラム**



OIST Neural Computation Unit

